

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANCY

POUR OBTENIR

le Titre de Docteur de l'Université de Nancy

MENTION SCIENCES

PAR

J.-M. VINCENS

Ingénieur agricole. — Licencié ès-sciences.

**1^{re} THÈSE : Contribution à l'Étude de la résistance
mécanique des sols en vue des travaux agricoles**

2^e THÈSE : Proposition donnée par la Faculté

soutenues le **13 JUIN 1925** *devant la Commission d'examen.*

Président MM. GAIN

Examineurs } BOUIN
MENTRÉ

LES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

49, BOULEVARD SAINT-MICHEL, PARIS

1925

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANCY

POUR OBTENIR

le Titre de Docteur de l'Université de Nancy

MENTION SCIENCES

PAR

J. - M. VINCENS

Ingénieur agricole. — Licencié ès-sciences.

1^{re} THÈSE : Contribution à l'Étude de la résistance
mécanique des sols en vue des travaux agricoles

2^e THÈSE : Proposition donnée par la Faculté

soutenues le

devant la Commission d'examen.



13 JUN 1925
Président MM. GAIN

Examineurs } BOUIN
MENTRÉ

LES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE
49, BOULEVARD SAINT-MICHEL, PARIS

1925

UNIVERSITÉ DE NANCY

FACULTÉ DES SCIENCES

Doyen : M. PETIT

Assesseur : M. GAIN

Professeurs Honoraires :

MM. HALLER, BLONDOT, CARTAN, BLAISE,
LE MONNIER, THOULET, MULLER, GUYOT.

Chargé de cours honoraire :

M. MILLOT

Professeurs :

MM.	PETIT	Chimie Agricole.
	VOGT	Mathématiques appliquées.
	GUNTZ	Chimie Minérale.
	GUENOT	Zoologie.
	GAIN	Botanique.
	GUTTON	Physique.
	HUSSON	Mécanique rationnelle.
	MAUDUIT	Electrotechnique.
	LEAU	Calcul différentiel et intégral.
	BOURION	Chimie physique et Electrochimie.
	DARMOIS (E.) ..	Physique.
	VAVON	Chimie organique.
	TRAVERS	Chimie industrielle.
	DARMOIS (G.) ..	Analyse supérieure.
	FALLOT	Géologie.
	LONGCHAMBON	Minéralogie.
	COURTOT	Chimie tinctoriale.
	MENTRE	Mécanique appliquée.
	BOUIN	Zoologie appliquée.
	CROZE	Physique.
	GRUMBACH . . .	Physique.
	CORNUBERT . .	Chimie.

Chargé de Cours :

M. JOLY Géologie de Lorraine.

Maitre de Conférences :

M. RAYBAUD Botanique.

Secrétaire : M. BERTRAND

A MON FILS GEORGES



Digitized by the Internet Archive
in 2026

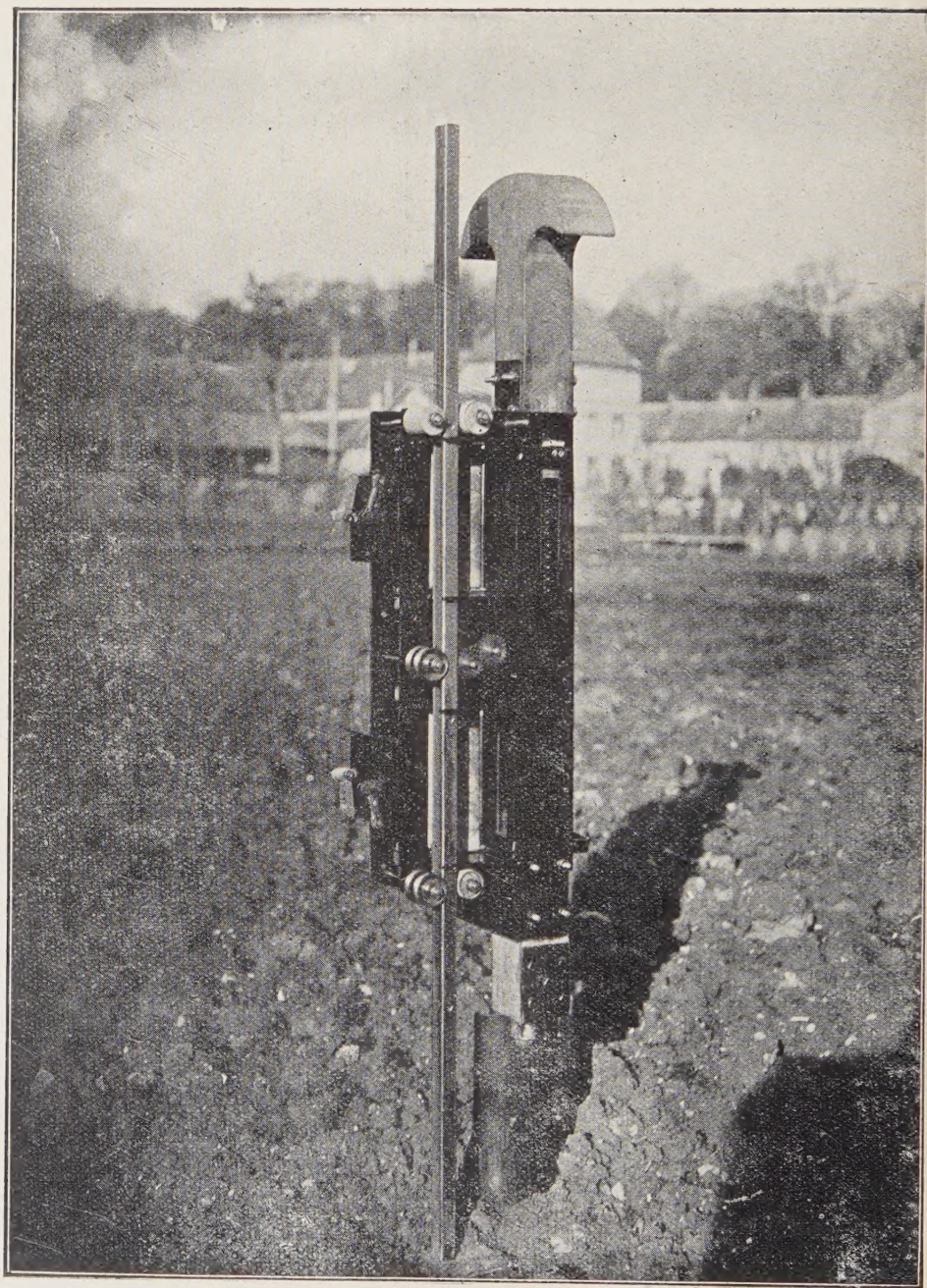
Introduction

Le travail de la terre est celui qui, dans une exploitation agricole nécessite la plus grande dépense de force motrice.

Le problème de l'économie de la traction dans les labours a été étudié au siècle dernier par des Agronomes parmi lesquels on peut citer, de Gasparin et Grandvoinnet (1). Ce problème dépend de plusieurs facteurs: La terre offre plus ou moins de résistance au passage des pièces travaillantes de la charrue, suivant les formes adoptées pour le coutre, le soc et le versoir. Cette résistance varie aussi avec le mode de transport de cette charrue. Elle varie encore suivant les dispositions adoptées pour les diverses pièces de direction et de réglage, telles que les manchons le sep et le régulateur. Elle varie enfin avec la constitution physique du sol.

L'étude approfondie de ces différents facteurs peut permettre une direction raisonnée des opérations culturales

(1) Les travaux de Gasparin sont exposés dans son cours d'agriculture générale en six volumes. Les recherches de Grandvoinnet sur la question des labours sont exposées dans les ouvrages suivants: *Etudes pratiques et théoriques sur les charrues*, traité complet de mécanique agricole (deuxième partie: machinerie agricole); puis dans un certain nombre d'articles insérés dans les *Annales agronomiques* publiées par le ministère de l'Agriculture.



Dispositif de l'appareil en plein champ.



Dispositif de l'appareil au laboratoire

au point de vue mécanique et une économie notable de la traction.

Grandvoinet a analysé longuement les dispositions de détails et les dispositions d'ensemble de toutes les pièces d'une charrue et les rectifications qu'il a apportées aux données empiriques de la pratique, ont guidé les constructeurs dans le perfectionnement de cette machine. Ce perfectionnement complété dans la suite par les observations d'un nombre considérable d'agronomes et de constructeurs dans les deux domaines intimement liés de la pratique et de la théorie, a amené la conclusion suivante : Il n'y a pas un type unique de charrue donnant satisfaction à toutes les exigences. Le problème est trop complexe ; les conditions sont trop variées.

Aussi, notre objectif sera-t-il seulement de déterminer à quel moment le labour devra être effectué avec une charrue donnée pour exiger le minimum de dépense d'énergie motrice. C'est par conséquent le dernier facteur envisagé précédemment qui nous préoccupe, c'est à dire l'influence du sol.

Influence du sol.

Nécessité du sondage.

La terre est un milieu constitué par l'association des éléments minéraux et organiques en voie continuelle de transformation. D'autre part, la proportion des éléments constituants varie à l'infini d'où la complexité des recherches, quand on veut fixer avec précision l'état physique et mécanique du sol au moment des travaux culturaux pour en déduire les conditions les plus favorables dans lesquelles ces travaux pourront être exécutés.

Le cultivateur qui a vécu longtemps sur sa terre, qui l'a travaillée et retravaillée souvent dans des conditions variées, finit par acquérir expérimentalement une certaine connaissance du milieu. Mais cette connaissance est seulement intuitive. Elle demande à être appuyée sur des données scientifiques, qui sont uniquement fournies, jusqu'à présent, par l'analyse et par les essais dynamométriques.

L'analyse physique fait connaître la constitution approximative par la détermination de certains éléments. Les caractéristiques que l'on possède ainsi sont très in-

téressantes mais insuffisantes pour les déductions pratiques immédiates.

Le dynamomètre enregistreur indique la valeur du travail moteur dépensé avec une charrue donnée. Il donne quelques résultats particuliers. La force de traction par décimètre carré de section du labour comme la calcule M. Ringelmann (1) professeur à l'Institut Agronomique, dépend beaucoup de la charrue employée. Grandvoinet écrivait déjà en 1882 à la suite de ses travaux : « Tous les
« essais dynamométriques faits dans la même terre avec
« des charrues de divers modèles montrent que pour le
« même labour, à la même heure, telle charrue exige tout
« au plus les deux tiers de la traction moyenne nécessaire
« à l'ensemble des autres charrues. » Pour caractériser les sols avec un dynamomètre, il convient donc d'utiliser toujours la même charrue. Dans tous les cas, les chiffres obtenus, associés aux résultats fournis par l'analyse physique ont permis de déduire une certaine connaissance de la résistance des sols.

Au milieu du siècle dernier, Poncelet et, après lui de Gasparin, pressentaient l'importance qu'il y aurait à établir une liaison entre toutes les expériences mécaniques, dans tous les terrains, dans tous les pays, par la création d'un instrument, qui permettrait en toutes circonstances, rapidement et facilement, la détermination des caractéristiques mécaniques du terrain dans lequel on va opérer. Ils avaient utilisé à cet effet une bêche dynamo-

(1) M. Ringelmann a effectué un grand nombre d'essais dynamométriques dont les résultats ont été donnés dans son cours et dans un grand nombre d'articles insérés dans les *Annales de l'Institut Agronomique* et dans le *Journal d'Agriculture pratique*.

métrique. Voici d'ailleurs ce qu'a écrit à ce sujet de Gasparin dans ses mémoires :

« Si l'on veut s'assurer de l'état actuel de la terre, on
« éprouve la résistance, en laissant tomber, bien vertica-
« lement, d'un mètre de haut, une bêche pesant 2 kilos 75.
« Nous avons trouvé que dans une terre marneuse durcie
« et piétinée, elle pénètre de 30 mm.

« La terre étant parfaitement propre à la culture, c'est
« à dire pour les terres sablonneuses qui ne s'attachent
« pas aux instruments et les glaises et les marnes for-
« mant des mottes, qui lancées avec force sur la terre, se
« brisent en menus morceaux et ne forment pas un corps
« pâteux et cohérent, la bêche s'est enfoncée de 59 m/m.
« Pour obtenir l'entier enfoncement du fer de la bêche
« dans le sol, fer qui avait 27 cm. de longueur, il a fallu
« faire tomber sur sa tête, de 5 mètres de hauteur, un
« poids de 3 k. 75.

« Après une pluie abondante, qui avait trempé le sol,
« la bêche dynamométrique s'est enfoncée de 80 m/m.

« Si l'on faisait tomber la bêche de moins de 1 mètre
« de hauteur, d'un demi mètre par exemple, on obtien-
« drait un enfoncement un peu plus que moitié de ce-
« lui obtenu en la faisant tomber de 1 mètre. Si elle tom-
« be de 2 mètres, on a moins que le double de cet enfon-
« cement.

« Le moyen que nous venons de décrire est le plus con-
« venable pour déterminer la résistance variable des ter-
« res; et, si la bêche dynamométrique est ramenée par-
« tout au même poids de 2 kilos 75 que nous avons indi-
« qué, les résultats seront comparables entre eux et avec
« ceux que l'on pourra obtenir ailleurs. On se bornera

« alors à dire que la terre offre une résistance de 30, de
« 59, de 80 millimètres.

« L'état de la terre le plus favorable au travail, ne
« donnera pas la même résistance dans toutes les natures
« de terres. Ainsi, nous trouvons une faible résistance
« dans les terres sablonneuses et qui varie peu par les
« variations hygrométriques du sol; mais si le sable
« quartzeux n'est pas bien pur, qu'il s'y mêle une cer-
« taine dose d'argile, la résistance devient plus sensible.

« La résistance dans les terrains calcaires augmente
« par le tassement du sol et peut devenir très grande, s'il
« a été longtemps inculte. Elle est toujours forte dans les
« terres argileuses. »

La bêche dynamométrique de Gasparin présente l'avantage d'être très simple et facilement transportable. Mais cet appareil est rudimentaire et peu sensible. L'action locale de tous les corps étrangers que l'on rencontre à la surface, est trop considérable par rapport à l'action propre de la terre. La moindre déviation au contact de cette surface peut modifier notablement l'importance de la pénétration. D'ailleurs cette dernière n'est jamais bien considérable. Sa valeur moyenne serait d'après les chiffres donnés par Gasparin de 3 à 4 cm.

Je me suis proposé de réaliser un appareil plus sensible, permettant de tâter rapidement les terrains d'une manière plus complète, et rendant possible leur classification au point de vue mécanique. Pour atteindre ce but, il fallait un contact plus intime et assez prolongé entre l'appareil et le terrain, afin que l'outil subisse complètement pendant sa pénétration les diverses influences du milieu.

Avant de décrire mon appareil, je vais dire quelques mots sur ces influences dont le rôle dans le travail de la terre est mal connu et qui pourrait faire l'objet de plusieurs thèses.

Lorsque le fer pénètre dans le sol, il exerce une certaine *compression* sur les particules terreuses. Ces dernières réagissent et tendent à reprendre la position initiale en exerçant une contre pression sur les faces latérales du fer. Sur ces mêmes faces s'exerce d'autre part l'action du *frottement* dont l'angle est d'environ 30°. Dans les terres consistantes, présentant une certaine ténacité par suite de l'attraction moléculaire, le fer, pour obtenir l'écartement, aura à vaincre la *cohésion*. Quand la matière se colle sur les surfaces de frottement, l'*adhérence* ajoute ses effets et la résistance à la pénétration est accrue. Dans ce dernier cas, le frottement de la surface métallique contre la terre est remplacé par le frottement de deux surfaces terreuses dont la rugosité est considérable. La détermination de l'angle de frottement, dans ce cas, paraît impossible à cause de l'entraînement des couches terreuses l'une après l'autre.

Ces influences d'ordre physique ont été analysées par Grandvoinet qui expose notamment les essais de Schübler sur la cohésion et l'adhérence. La terre était réduite en pâte, pétrie dans un moule, puis séchée à l'étuve sous une faible pression. Les parallélipipèdes terreux ainsi obtenus par moulage avaient une section carrée de 15 m/m. de côté. Ils étaient posés sur deux appuis distants de 40 m/m. et chargés en leur milieu d'un poids suffisant pour provoquer la rupture. Schübler obtenait ainsi ce qu'on peut appeler la ténacité absolue des diverses terres.

qui était de beaucoup supérieure à la résistance à la cohésion des mêmes terres à l'état naturel. En ce qui concerne l'adhérence, il a fait des essais dans le but de déterminer les forces nécessaires pour provoquer la chute d'un plateau d'un décimètre carré de bois ou de fer adhérent à diverses terres humides. La connaissance de ces forces ne permet pas de dégager l'accroissement de traction résultant de l'adhérence des terres sur les pièces travaillantes de la charrue.

L'analyse de ces influences diverses est intéressante pour les recherches auxquelles elle doit présider. Mais il est utile d'avoir à sa disposition un appareil enregistrant la résultante de toutes ces influences, car il sera peut-être plus facile d'étudier cette analyse à la lumière des résultats acquis par l'expérimentation.

Revenons à la conception de l'appareil. L'idée qui s'est présentée naturellement à mon esprit a été d'interposer un ressort avec enregistrement entre la poignée et le fer de la bêche. L'effort maximum que peut fournir un ouvrier appuyant sur la poignée pendant la pénétration dans un terrain résistant, sans appuyer simultanément avec le pied sur le fer, et sans élan doit être égal logiquement au poids de l'ouvrier : 60 à 80 kilos. Le ressort devait donc résister à cet effort. Un dispositif spécial devait ensuite établir la liaison entre la poignée, le ressort, le fer de pénétration et le mécanisme de l'enregistrement. Il était d'ailleurs nécessaire d'enregistrer la résistance à la pénétration et ensuite la résistance à l'extraction, afin de prolonger l'influence du milieu sous des formes variées avec des termes de comparaison aussi nombreux que possible.

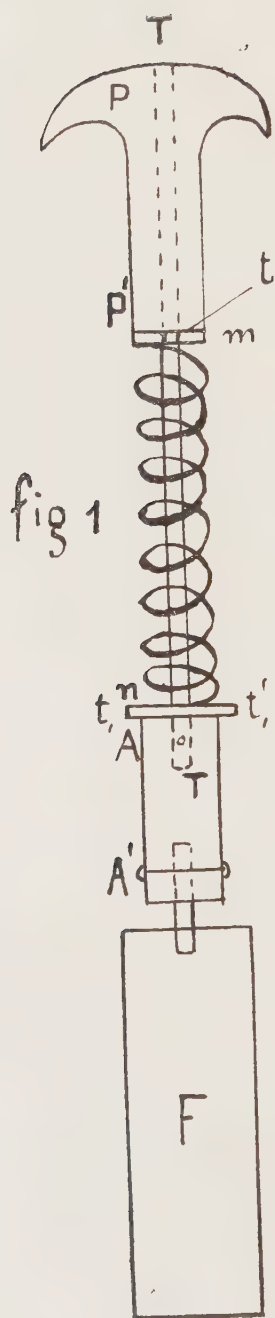
Description de la sonde

Premier dispositif pour le sondage en plein champ.

Je donne ici la description du deuxième modèle de la sonde. Il dérive du premier avec quelques modifications de détail qui ne changent rien au principe pour lequel j'ai obtenu un brevet d'invention délivré le 17 octobre 1924 sous le numéro 592.637.

Considérons d'abord un prisme en bois A A' (fig. 4) d'une hauteur de 150 m/m ayant comme section droite un carré de 45 m/m de côté. Ce prisme est percé suivant son axe de deux évidements cylindriques. Dans celui de la partie supérieure en A se trouve logé un tube de cuivre T T' chevillé et par conséquent à demeure. Dans celui de la partie inférieure en A' se trouve logée une tige d'acier sur laquelle est fixé le fer F qui pénétrera dans le sol. Ce cylindre d'acier est percé d'un trou comme le prisme, pour permettre sa fixation avec un boulon de serrage. Ce mode de fixation doit permettre le changement rapide de différentes formes de fer. Les deux faces parallèles du prisme qui sont percées, sont armées de deux plaques métalliques sur lesquelles prend appui le boulon de fixation.

Le tube de cuivre T T' sert de guide au ressort sur lequel peut appuyer à la partie supérieure un autre prisme P P' ayant les mêmes dimensions que le précédent A A',



avec cette différence dans la forme qu'il est terminé en haut par une poignée. Il est percé de part en part suivant son axe pour permettre son glissement le long du tube de cuivre pendant que le ressort fléchit.

Considérons maintenant deux petites pièces m et n (fig. 1) identiques, dont l'une est représentée par la figure 2. Cette pièce est percée en son centre comme le prisme, pour permettre aussi son glissement le long du tube de cuivre. Elle présente d'autre part deux tenons t et t' opposés dont je précise le rôle plus loin. Ces deux pièces sont fabriquées avec du buis dans l'épaisseur duquel se trouve logée l'extrémité du ressort. Elles sont armées chacune sur toute la surface d'une plaque de fer destinée à renforcer les tenons qui doivent résister à la flexion. Elles sont interposées : l'une, entre l'extrémité inférieure du ressort et le prisme inférieur en n ; l'autre entre son extrémité supérieure et le prisme de la poignée en m .

Les axes des tenons des pièces m et n sont orientés à 90° l'un par rapport à l'autre. Il en résulte que les tenons t et t' de la pièce m sont disposés en avant et en arrière de la figure; ceux de la pièce n (t , et t' ,) à gauche et à droite dans le plan de la figure. Ces tenons sont destinés à permettre les actions successives sur les extrémités du ressort des plans m et n quand ils subissent eux-mêmes l'action de la poignée : 1°) le plan m sous l'influence d'un appui de haut en bas à la pénétration de l'outil; 2°) le plan n sous l'influence d'une traction de bas en haut à l'extraction.

Examinons de plus près ces deux actions. D'abord la première de *haut en bas* : la force exercée sur la poignée se transmet sur le plan m et par son intermédiaire sur le



fig 3

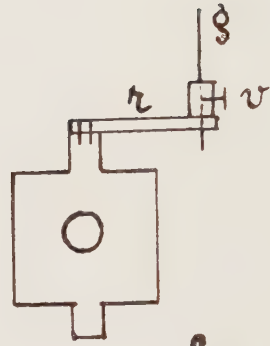


fig 5

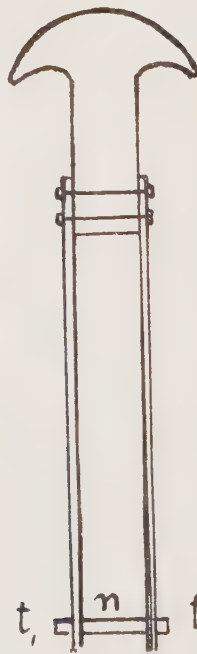


fig 4



ressort. Les tenons de ce plan m coulisent alors le long de deux échancrures c et c' pratiquées dans deux plaques parallèles métalliques. L'une de ces plaques est représentée par la figure 3 avec la lumière c et deux évidements K et K' dont nous verrons le rôle plus loin. Ces plaques métalliques sont fixées solidement sur le prisme inférieur par 4 boulons.

La deuxième action de *bas en haut* s'exerce sur les 2 tenons t_i et t'_i du plan n qui coulisent dans deux échancrures c_i et c'_i appartenant à deux autres plaques métalliques parallèles, boulonnées sur le prisme de la poignée comme le montre la figure 4. Le ressort est alors comprimé de bas en haut, son extrémité supérieure étant retenue par le plan m dont les tenons sont eux-mêmes arrêtés par les bords supérieurs des lumières c des deux plaques, dont l'une est représentée dans la figure 3. Pendant cette action, les deux plaques en question, qui sont boulonnées, je le répète, sur le prisme inférieur, sont soulevées avec lui et entraînent le fer qui est ainsi extrait du sol.

Les tenons des plans m et n ne sont pas seulement utilisés pour permettre la compression du ressort. A l'un des tenons de chaque plan est fixée une lame élastique ι (fig. 5) dont l'extrémité porte un petit tube dans lequel peut coulisser un crayon en cuivre g retenu par une vis de serrage v . L'élasticité de la lame donne de la souplesse à l'appui du crayon sur le papier pendant leur déplacement relatif. On évite ainsi la déchirure du papier.

Le crayon du plan m descendra quand le ressort fléchira à la compression. Le crayon du plan n montera à son tour verticalement quand le ressort fléchira à l'extraction.

profil 1

face

profil 2

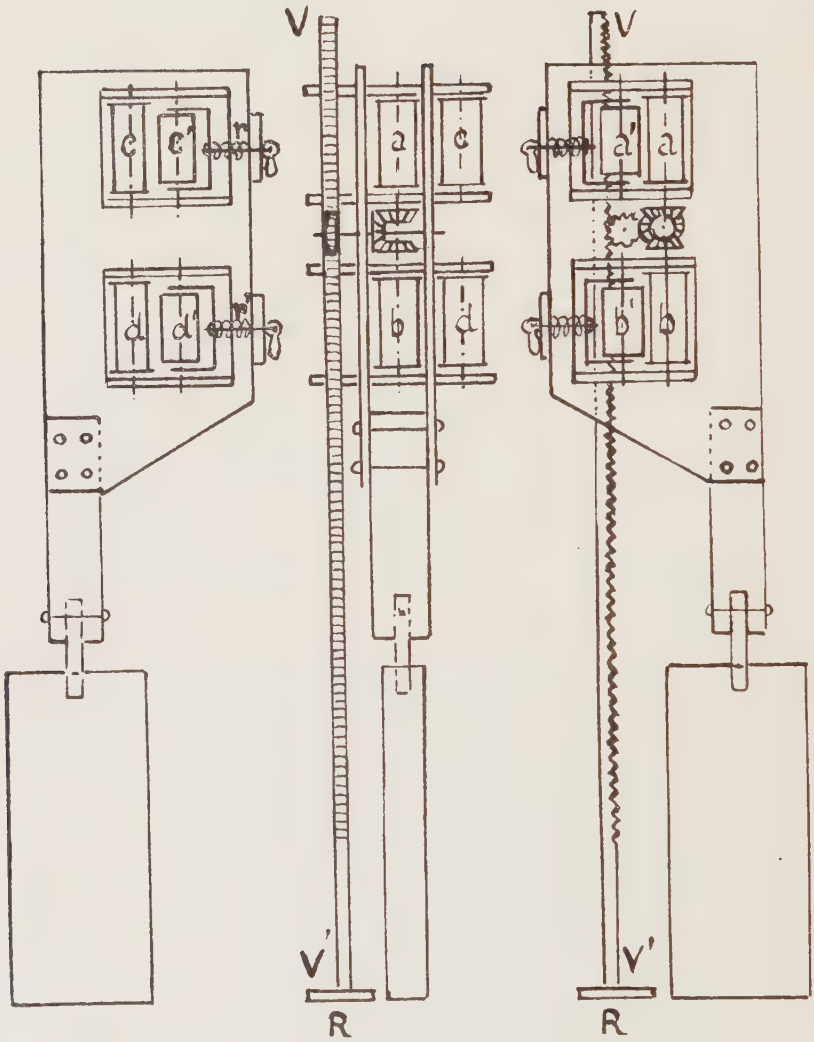


fig 6

Il faut maintenant ajouter un dispositif qui va permettre d'enregistrer ces deux mouvements proportionnels aux efforts en fonction d'un troisième mouvement proportionnel au déplacement du fer dans le sol.

La charpente métallique du mécanisme de l'enregistrement est montée sur les bords libres des évidements *K* et *K'* des plaques métalliques de la fig. 3. Sur les bords inférieurs et supérieurs de ces évidements, sont fixés 4 plans horizontaux (fig. 6) constituant comme un plancher et un plafond percés pour permettre le passage des axes de rotation de 8 cylindres : 4 à l'étage supérieur et 4 à l'étage inférieur; l'étage intermédiaire étant utilisé pour le logement des engrenages. L'étage supérieur enregistrera la compression. L'étage inférieur enregistrera l'extraction.

Les deux cylindres moteurs *a* et *b* sont sur une même verticale (fig. 6 face). Sur leurs deux axes, sont clavetés à l'étage intermédiaire, deux pignons coniques en prise avec un troisième qui est claveté sur un axe horizontal. Sur ce dernier axe est claveté un pignon droit en prise avec une crémaillère verticale *V V'*. Cette crémaillère présente à son extrémité inférieure une plaque de tôle rivée *R* qui s'appuie sur le surface du sol à la compression et qui est retenue par le pied de l'opérateur à l'extraction. Par conséquent, le pignon descend avec tout l'appareil le long de la crémaillère à la compression et remonte à l'extraction, en transmettant son mouvement de rotation aux deux cylindres *a* et *b*. Malgré le changement de sens de ces deux mouvements, le train d'engrenage est disposé de telle sorte que les deux cylindres entraîneront le papier successivement du même côté de l'appareil après embrayage et débrayage réciproques.

Le papier est enroulé sur les tambours *c* et *d* (profil 1) et se trouve maintenu par l'appui de deux rouleaux *c'* et *d'* sollicités par deux ressorts *r* et *r'* appuyant sur leurs cadres de soutien. Les axes de ces rouleaux peuvent coulisser pendant leur éloignement ou leur rapprochement des tambours dans deux rainures correspondantes pratiquées dans les plans horizontaux du bâti.

En regard des deux cylindres moteurs *a* et *b* (profil 2) sont deux autres rouleaux *a'* et *b'* dont les dispositions symétriques sont identiques à celles des rouleaux *c'* et *d'*. Leur rôle est cependant plus important. Alors que ces derniers servent seulement de soutien au papier pour empêcher son déroulement automatique et assurer par suite sa tension d'enroulement, les rouleaux *a'* et *b'* participent à l'entraînement du papier comprimé par eux sur chaque cylindre moteur, quand leur petit ressort agit pour le rapprochement. Les 4 rouleaux *a'* *b'* *c'* *d'* sont recouverts d'un gaine en caoutchouc qui empêche le glissement du papier.

Les actions des 4 petits ressorts sont réglées par 4 petits excentriques correspondants, visibles sur les 2 profils de la figure 6. Ces excentriques prennent leur appui sur deux cloisons fixées sur le bâti, perpendiculairement au plan de la figure. Ils sont reliés, chacun, au cadre de soutien de leurs rouleaux respectifs, par une petite tringle dirigée suivant l'axe de chaque ressort à boudin. Leur action et celle du ressort correspondant sont donc antagonistes.

Les deux excentriques, correspondant chacun à un cylindre moteur, permettent l'embrayage et le débrayage successifs à la pénétration et à l'extraction de l'outil.

Les déplacements relatifs du crayon et du papier entraînent l'enregistrement d'un diagramme. Ces déplacements relatifs se font suivant les directions de deux axes de coordonnées rectangulaires. L'entraînement du papier, qui est proportionnel au déplacement du fer dans la terre, se fait dans la direction de l'axe des x qui sera l'axe des déplacements. La flexion du ressort s'exerce dans la direction de l'axe des y qui sera l'axe des efforts. Etant donné les deux dimensions de la surface d'un diagramme, cette surface sera l'expression du travail dépensé, soit pendant la pénétration, soit pendant l'extraction.

Dans l'appareil que j'ai construit, le rapport entre le nombre des dents du pignon qui est en prise avec la crémaillère, et le diamètre du cylindre moteur, a une valeur telle que l'entraînement du papier est plus grand que le déplacement du fer dans le sol. Cette multiplication est inutile et entraîne une complication dans les calculs. Elle est donc à supprimer.

Les fers auront une longueur de 35 cm. Cette dimension est celle des premiers labours de défoncement. Les dimensions généralement adoptées dans la pratique pour classer les différents labours sont en effet les suivantes :

Jusqu'à 8 à 10 cm. pour les labours légers, de 10 à 20 cm. pour les labours moyens. De 20 à 30 cm. pour les labours profonds. Au delà de 30 cm. pour les labours de défoncement. Cette classification n'ayant rien d'absolu, car elle dépend de l'épaisseur de la couche arable.

Quelle forme rationnelle faudra-t-il donner aux fers ?

Le choix de cette forme a une importance considérable sur la physionomie du diagramme (tableau 11) et en fai-



fig 7

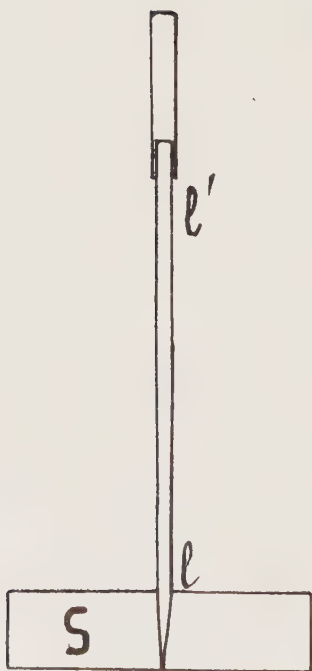


fig 8

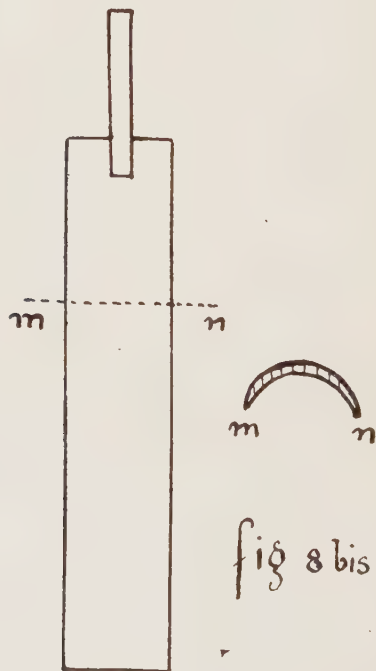


fig 8 bis

sant varier la forme géométrique dans un milieu donné, on pourra sans doute en tirer des déductions intéressantes.

Le fer peut présenter une section variable d'une extrémité à l'autre comme l'indique la figure 7. La pénétration serait plus facile. Cependant, le but que nous poursuivons ici n'est pas de faciliter la pénétration, ce n'est pas un instrument de travail que nous manipulons. Nous cherchons à établir des comparaisons entre différents milieux ou entre différents états d'un même milieu. Ces milieux ne sont pas absolument homogènes. Nous enregistrons une résistance moyenne. La détermination de la forme est subordonnée pour le moment à l'étude du milieu. Il est donc préférable que la section du fer ne change pas de valeur pendant la pénétration dans les couches superposées successivement traversées.

Le tranchant du fer ouvre le passage. Les deux faces latérales qui prolongent vers le haut les biseaux du tranchant, subissent le frottement et l'adhérence. La résistance à la pénétration qui en résulte va en croissant non seulement parce que la densité des couches sous jacentes va en augmentant, mais aussi parce que une nouvelle tranche du fer pénètre à chaque instant à la surface du sol pour ajouter son action à celle des tranches précédentes. Pour supprimer cet accroissement, j'ai imaginé un fer constitué par une lame S (fig.8) dont la hauteur est aussi réduite que possible soit 40 m/m. Cette lame S est fixée à la partie inférieure d'une tige cylindrique l l' . Elle subira à chaque instant, à partir du moment où le bord du tranchant se trouvera à 40 m/m de la surface, la résistance d'une couche de terrain de 40 m/m. Dans ce cas, le diagramme fournira des renseignements précis sur la variation de la

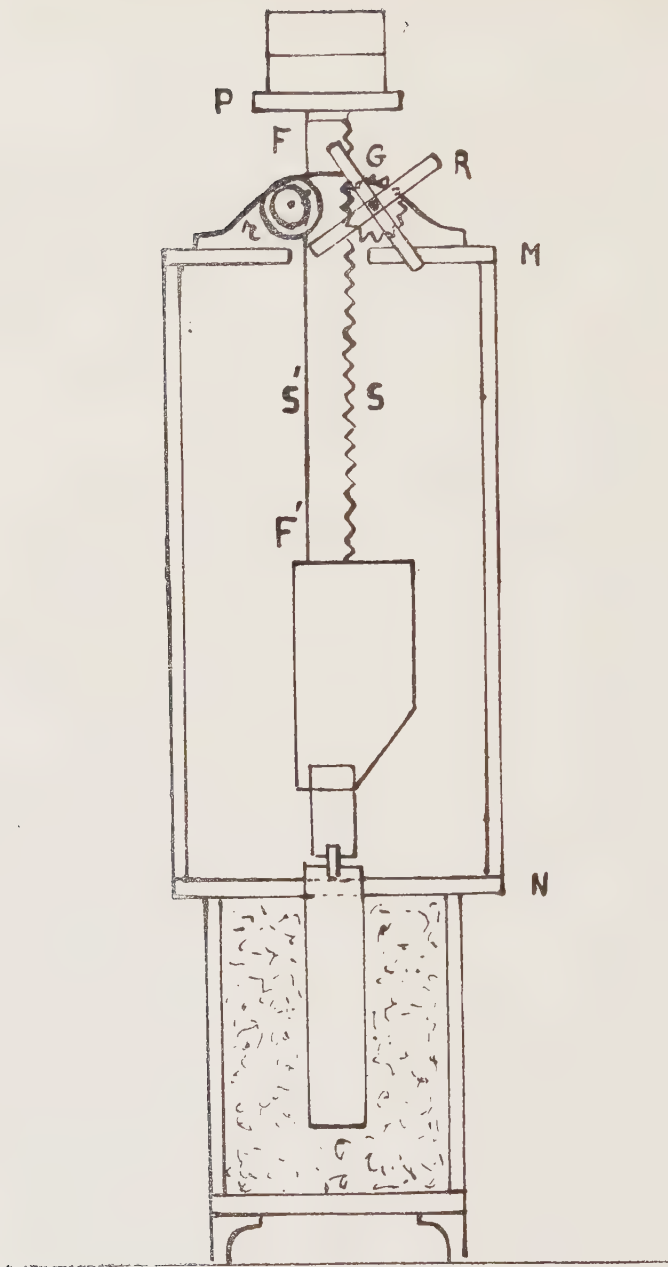


fig 9

résistance suivant la couche traversée. La tige $l\ l'$ subira bien la résistance de la terre, sur toute la profondeur comme les fers déjà utilisés, mais pour en faire abstraction il suffira de soustraire du diagramme précédent celui que l'on obtiendra avec une tige $l\ l'$ non munie du fer S .

Tous les autres fers ont la forme géométrique cylindrique ou rectangulaire; et dans ce dernier cas, pour augmenter leur résistance sans leur donner une trop grande épaisseur, leur section est concave comme celle d'une gouge (fig. 8bis). Nous pouvons employer une série de gouges de différentes largeurs suivant la nature du terrain étudié. Cependant, pour l'étude comparée de tous les terrains il faudra choisir une dimension définitivement adoptée qui ne subira pas une résistance trop considérable dans les terres fortes.

Autre disposition d'ensemble de l'appareil. — Pour les expériences de laboratoire et pour certaines applications sur le terrain, il est préférable de remplacer la poignée par un plateau portant des poids marqués. On est ainsi plus maître de la conduite de l'opération par le réglage de la pression et l'on peut supprimer l'influence du poids de l'appareil pendant la pénétration du fer.

Le prisme qui porte la poignée est remplacé par un autre prisme quadrangulaire $F\ F'$ (fig. 9) d'une longueur de 0 m. 50. A son extrémité supérieure, est fixé un plateau P portant des poids marqués. Le long d'une de ses faces S est fixée une crémaillère qui engrène avec un pignon G claveté sur l'axe d'une roue manivelle R . La face opposée S' s'appuie sur un rouleau à gorge r qui empêche le déplacement latéral du prisme, pendant son déplacement

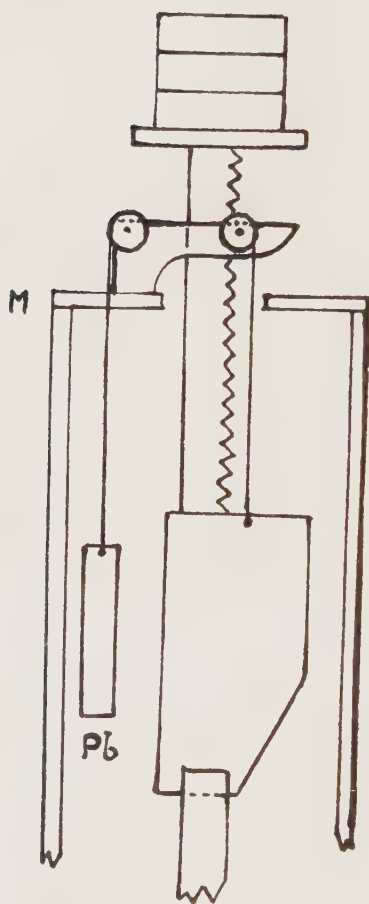


fig 10

vertical. Ce dernier mouvement de bas en haut est obtenu pour le déterrage de l'appareil. le mécanisme précédemment décrit fonctionnant alors comme un cric. L'appui de ce cric s'exerce sur une tablette *M* portée par quatre colonnes, dont les extrémités inférieures sont fixées sur une autre tablette *N* reposant sur les bords de la caisse qui contient la terre à expérimenter. Cette tablette est percée en son centre d'une large ouverture permettant le passage du fer. L'ensemble de l'appareil est ainsi logé dans une charpente qui lui sert de soutien et qui guide dans une certaine mesure son mouvement.

D'autre part, par l'intermédiaire de quatre poulies de renvoi, montées à l'intérieur de deux chapes parallèles fixées sur la tablette *M* (fig. 10) on peut contrebalancer le poids de l'appareil par la suspension d'une masse égale constituée par une plaque en plomb.

Utilisation de la sonde Traitement de la terre.

L'appareil étant ainsi construit, j'ai entrepris des essais en vue de son utilisation pour la recherche d'une méthode de travail.

Des essais comportent toujours des tâtonnements pénibles surtout avec une installation sommaire pour laquelle les dépenses ont été restreintes.

J'ai porté mon attention sur une question, choisie parmi celles que je me propose d'étudier dans la suite, soit la recherche de la relation qui existe entre la densité d'une terre, son humidité, et la pénétration d'un outil de forme déterminée.

Il me fallait donc obtenir à volonté les variations simultanées de l'humidité et de la densité. A chaque état, j'ai fait correspondre la somme des surfaces de deux diagrammes : Un à la pénétration et l'autre à l'extraction correspondante. Cette somme est nécessaire de toutes façons quand on utilise la poignée. En effet, le fer pénètre d'abord dans le sol sous l'action unique du poids de l'instrument (5 kilos environ) sans flexion du ressort. Dès que la résistance devient supérieure à 5 kilos, le ressort fléchit proportionnellement à la résistance. Par conséquent, au début de la pénétration, le poids n'est pas enregistré bien

qu'il participe à cette pénétration. A l'extraction il agit dans le même sens que la résistance du sol pour entraîner la flexion du ressort, bien que son influence ne doive pas être enregistrée. D'où une compensation dans l'addition. Cependant, cette influence parasite, ajoutée d'une part et retranchée d'autre part, ne s'exerce pas chaque fois dans la même région du sol; et par conséquent dans les mêmes conditions. La première action s'exerce au début de la pénétration près de la surface du sol; la deuxième s'exerce au début de l'extraction, à la profondeur maximum. L'erreur relative qui peut en résulter est en somme peu importante, car le diagramme est obtenu à une grande échelle. D'ailleurs on pourra toujours supprimer cette influence en utilisant la charpente de soutien avec la masse en plomb qui équilibre le poids de la sonde.

Variation expérimentale de l'Humidité. — On ne peut pas enlever à la terre toute l'eau qu'elle contient. Il faudrait la chauffer à une température telle qu'elle subirait une certaine décomposition, et qu'elle perdrait par suite une partie de ses propriétés physiques. J'ai alors opéré avec précautions en la desséchant par petites fractions de 1 à 2 kilos, chauffées légèrement dans une bassine en zinc. Lorsque la quantité traitée était assez chaude, je l'étendais rapidement sous une faible épaisseur sur une aire bien sèche où elle était remuée pour faciliter l'évaporation. Ainsi desséchée la terre contenait encore 3,7 0/0 d'eau.

La première expérience a été faite avec ce taux d'humidité. De l'eau a été ensuite réincorporée, par fractions connues avec un pourcentage déterminé avant chaque

sondage. Pour ajouter de l'eau, j'ai arrosé chaque fois la terre après l'avoir sortie de la caisse et l'avoir répandue sur une aire où elle était brassée pour une bonne répartition de l'humidité. Elle était ensuite replacée dans la même caisse avant chaque sondage. Le brassage, puis la mise en caisse, ont pour effet de provoquer une certaine évaporation, qui diminue le pourcentage de l'humidité. J'ai alors déterminé la valeur de cette évaporation, en effectuant la différence des nombres, qui expriment les poids de la caisse remplie de terre, avant, puis après l'addition de l'eau. Cette différence accusait au début une perte de 20 à 30 grammes pour une addition totale de 6 à 800 grammes d'eau dans 30 kilos de terre. J'ai alors ajouté un supplément *a priori* à la quantité d'eau exigée pour chaque pourcentage. Je suis arrivé ainsi à trouver seulement, une différence de 5 à 10 grammes, résultat, qui peut être considéré comme suffisant.

Variation expérimentale de la densité $\frac{P}{V}$. La densité n'est qu'un nombre qui figure une qualité du milieu. Il ne faut pas perdre de vue que le milieu est un mélange complexe difficile à caractériser même d'une manière grossière par quelques nombres.

Pour obtenir des densités variables avec un même pourcentage d'eau, j'ai fait subir au mélange des compressions croissantes. Ces différentes compressions font varier le volume de l'ensemble, tandis que les poids respectifs de la terre sèche et de l'eau restent évidemment invariables, sauf évaporation.

Aux fortes compressions, je peux considérer que la présence de l'eau dans les espaces lacunaires empêche le

rapprochement des particules terreuses sèches. L'eau, étant incompressible, devrait donc limiter la diminution de volume du mélange. Dans tous les cas, lorsque la terre sèche est additionnée d'eau à 20 0/0, la compression de l'ensemble entraîne une diminution de volume bien plus considérable, à égalité de pression, qu'avec de la terre humide à 10 0/0. L'action de l'eau est en somme très complexe et son étude exigera des expériences très nombreuses, dans des conditions bien définies. Indépendamment des influences diverses résultant de l'infiltration, l'imbibition, la tension superficielle, la dissolution des gaz etc., l'eau paraît agir comme une sorte de lubrifiant entre les particules de terre sèche, qui glissent alors plus facilement les unes contre les autres. Toutes les influences varient avec la nature de la terre traitée (siliceuse, argileuse, calcaire, silico-argileuse, argilo-calcaire) et suivant la manière dont le taux d'humidité a été obtenu (l'eau peut-être introduite dans la terre instantanément ou lentement). La terre ayant été primitivement gorgée d'eau peut avoir subi une dessiccation lente ou une dessiccation rapide.

Dans la terre, des vides assez considérables existent entre les particules. Quand on ajoute de l'eau, elle s'infiltré dans ces vides. L'expérience m'a montré que le volume occupé par l'ensemble n'était pas modifié d'une manière sensible. La densité du mélange est donnée par le rapport $\frac{P}{V}$ des deux nombres qui expriment les valeurs du poids total et du volume total. Si l'on admet que le volume total ne change pas, on peut calculer la densité qu'aurait la même terre sèche, quand on connaît le pourcentage de l'humidité.

Je prends comme exemple les 30 kilos de terre que j'ai traités dans mes expériences. L'humidité étant de 3,7 0/0, la quantité d'eau contenue dans ce poids de terre est égale à $\frac{30 \times 3,7}{100} = 1^k.11$. La quantité de terre sèche correspondante est donc égale à $30 - 1,11 = 28^k.89$.

La densité de la terre humide est égale à $\frac{30}{24,019} = 1,24$.

Cette terre étant contenue dans un volume de $24,019d^{m3}$

Celle de la terre sèche sera égale à $\frac{28,89}{24,019} = 1,20$.

La détermination de la densité en plein champ présente quelques difficultés. Or il convient, au point de vue scientifique et pratique d'utiliser une méthode, qui conserve la même signification dans tous les cas.

Pour prélever un volume de terre dont les dimensions géométriques sont bien établies, on peut employer la méthode utilisée par Debérain, ancien professeur de chimie agricole à l'école de Grignon, pour calculer le foisonnement de la terre. Il enfonçait dans le sol, verticalement, un prisme droit de volume connu, en tôle d'acier, sorte de boîte métallique, sans fond et sans couvercle.

J'opère aussi assez simplement de la manière suivante : je creuse une tranchée verticale ; je dégage la surface en enlevant à partir du bord de la tranchée tous les débris végétaux de cette surface de manière à obtenir un plan horizontal. L'angle droit que ce plan doit faire avec la paroi verticale de la tranchée est vérifié avec une équerre de menuisier . Je découpe dans cet angle un prisme droit que je pèse pour avoir un des deux termes du rapport $\frac{P}{V}$. L'enlèvement de la terre entraîne une déformation du prisme dont on détermine difficilement les dimensions.

Pour obvier à cet inconvénient je ne me préoccupe pas du prisme que j'enlève par fraction quelconque. Je m'efforce surtout d'obtenir une forme géométrique bien régulière du vide laissé a la suite de l'enlèvement de ce prisme et c'est dans ce vide que je prends les dimensions. On rencontrerait cependant quelques difficultés à employer ce procédé dans une terre qui s'effrite facilement. J'ai imaginé alors la méthode suivante dont l'application est générale :

Sur la paroi verticale de la tranchée (fig 44) j'enfoncé un cylindre de cuivre à bord tranchant, dont le biseau comprime la terre vers l'extérieur suivant les flèches 1 et 2. La pénétration est obtenue en frappant suivant la flèche 3 sur une planchette *P* appuyée sur le bord opposé, jusqu'à ce que ce bord affleure la paroi verticale de la tranchée en *V*. Le bord tranchant vient alors s'appuyer contre une plaque de tôle *T* qui a été enfoncée préalablement dans la terre, verticalement et parallèlement à la paroi *V* à une distance de cette dernière, égale à la longueur du cylindre *h*. Cette plaque de tôle résiste à la poussée du cylindre de terre, dont la pénétration dans le cylindre métallique est retardée par suite du frottement contre la paroi interne. Sans cette précaution, le cylindre de terre ne pénétrerait pas en entier dans le cylindre métallique et le prélèvement serait incomplet. Le cylindre métallique est taré. Son volume est connu. La densité peut-être immédiatement déterminée sur un barème.

Avec cette méthode, on peut connaître les différentes densités depuis la surface jusqu'à une certaine profondeur en enfonçant sur la paroi de la tranchée plusieurs

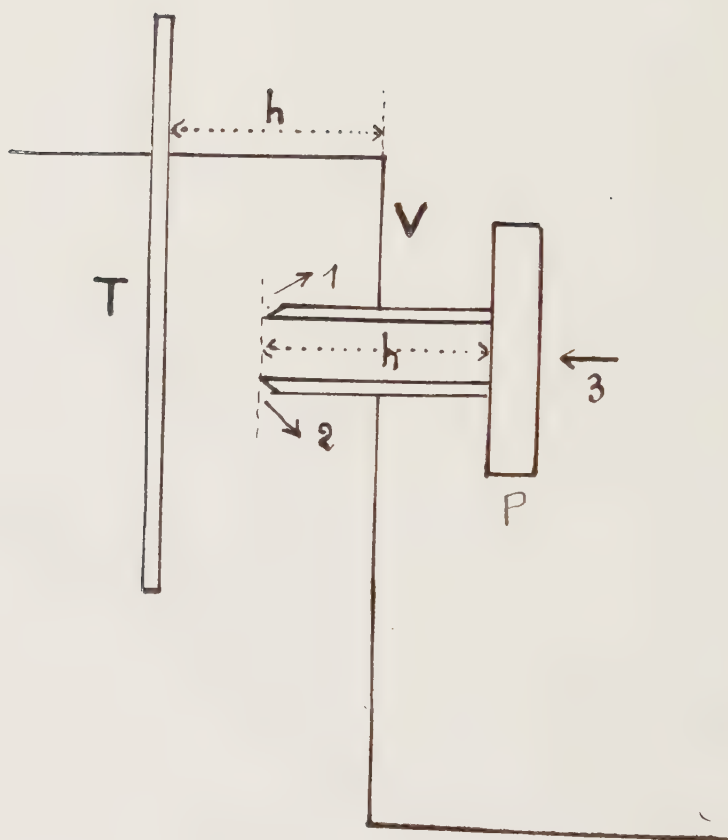


fig 11

cylindres à des profondeurs croissantes. Pour les enlever, il faut les dégager au préalable, avec précautions, de la terre qui les recouvre, afin d'éviter l'arrachement.

La plaque de tôle pourrait être sans doute évitée, si le cylindre était remplacé par un tronc de cône, dont la différence des deux bases serait peu importante. La terre pénétrerait par la petite base qui serait considérée pour le calcul comme étant la section d'un cylindre de même hauteur que le tronc de cône. La pénétration serait plus pénible à cause de l'augmentation de la résistance extérieure; mais la résistance intérieure serait très atténuée et pratiquement sans influence nuisible.

M. Ringelmann, professeur à l'Institut agronomique emploie pour déterminer la densité, la méthode du flacon. Il prend un vase contenant un peu plus de 2 litres. Sur ce vase, sont tracés deux traits de repère. Le trait inférieur indique le niveau du premier litre; le trait supérieur celui du deuxième litre. On pèse le vase contenant de l'eau jusqu'au premier trait, soit p le nombre trouvé. On introduit ensuite de la terre dans le vase jusqu'à ce que le niveau de l'eau atteigne le deuxième trait de repère. On pèse. Soit P le nombre trouvé. La différence $P-p$ représente le poids d'un litre de terre. M. Ringelmann a trouvé que la traction augmente en même temps que la densité ainsi calculée, dont les valeurs extrêmes sont égales à 1,8 et 2,2.

La méthode du flacon fait abstraction des espaces lacunaires plus ou moins grands suivant le tassement. Elle fournit ce qu'on peut appeler la densité nette. Comme les espaces lacunaires ont une grande importance au

point de vue de la résistance à la pénétration des outils j'ai préféré mesurer la densité brute.

Si je considère dans la caisse, une succession de volumes différents, obtenus par le tassement d'une même masse de terre, et par conséquent une variation notable dans la densité brute, je dois obtenir théoriquement par la méthode du flacon une densité constante. D'ailleurs le sondage accuse des variations sensibles dans le travail fourni.

Voici à titre d'exemple, les résultats d'une opération effectuée dans une terre cultivée.

1° *Par la méthode des cylindres.* — Quatre cylindres en cuivre identiques ayant chacun un diamètre de 47 m/m et une hauteur de 151 m/m ont été enfoncés dans la paroi verticale de la tranchée.

L'axe du premier	étant à une profondeur de 8 centimètres
» second	» » 12 »
» troisième	» à 16 »
» quatrième	» » 20 »

	Tare	Poids total	Poids de la terre	Volume	Densité brute
1 ^o cylindre.....	0,145	0,550	0,405	0,262	1,55
2 ^o cylindre.....	0,146	0,560	0,414	0,262	1,58
3 ^o cylindre.....	0,146	0,565	0,419	0,262	1,60
4 ^o cylindre.....	0,148	0,566	0,420	0,262	1,60

Densité moyenne : 1,58.

2° *Par la méthode du flacon.* — Poids de l'éprouvette avec 1 litre d'eau : 2,435. Poids de l'ensemble après ad-

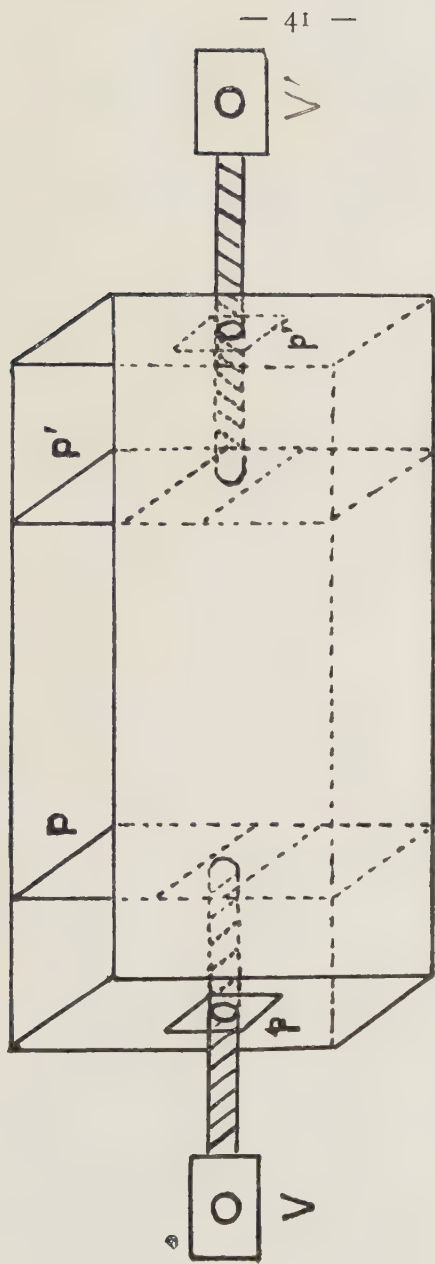


fig 12

dition d'un litre de terre : 4,400. Densité nette 4,400 — 2,435 = 1,965.

Variation du volume par compression de la terre. —

Pour comprimer une masse de terre, j'opère de la manière suivante : A l'intérieur d'une caisse prismatique allongée (fig. 12) sont logées deux vannes P et P' pouvant glisser dans le sens de l'axe de la plus grande dimension comme deux pistons à frottement doux.

Le mouvement des deux pistons est obtenu par deux vis de serrage d'étau V et V' tournant dans deux plaques de fer taraudées p et p' fixées sur les deux faces parallèles correspondantes de la caisse. La terre étant enfermée dans l'intervalle laissé libre entre les deux plateaux P et P' peut-être comprimée par le rapprochement de ces plateaux. En fait, au lieu d'une vis de serrage sur chaque piston, il y en a quatre, car la pression à transmettre est considérable, lorsqu'on veut obtenir les dernières densités. L'intérieur de la caisse est garni de zinc pour empêcher toute perte d'humidité. La partie supérieure peut-être fermée pendant la compression par un fort couvercle, armé de brides métalliques s'aggrafant sur deux crochets solidaires du coffre. Après chaque compression, le couvercle est relevé avant l'application du sondage, et la terre, sans modification apparente de volume, conserve son tassement. L'avantage de ce dispositif réside dans ce fait que le déplacement des particules a lieu dans le sens horizontal. Dans ces conditions le fer pénètre à la même profondeur dans toutes les expériences et les diagrammes sont comparables.

Nota : Pour contrebalancer l'action des vis de pression

et éviter la dislocation de la caisse, il a été nécessaire de consolider le tout avec huit vis de serrage antagonistes des vis de pression agissant sur 4 brides métalliques; deux à la partie supérieure, deux à la partie inférieure de la caisse.

Résultats des expériences

Le sondage a été effectué avec une tige cylindrique d'acier de 10 m/m de diamètre.

Analyse de la terre traitée. (1)

Analyse physique ‰ terre fine	{	Sable silicieux 21,55
		Sable calcaire : 0,78
		Sable fin : 62,02
		Argile : 2,50
		Calcaire éléments fins : 0,480
		Cailloux : néant.
Analyse chimique ‰‰	{	Azote : 2,13
		Acide phosphorique : 0,98
		Potasse : 2,02
		Chaux en Co^3Ca : 14,50.

Une certaine quantité de cette terre a été desséchée comme je l'ai indiqué dans les notes précédentes jusqu'à

(1) Cette analyse ainsi que les déterminations des différentes humidités ont été effectuées par M^r Barjaud, chimiste de l'Institut des recherches agronomiques.

un taux d'humidité de 3,7 0/0. 30 kilos ont été ensuite prélevés puis emprisonnés entre les deux plateaux P et P' de la caisse des pressions (fig. 12). La distance D entre P et P' a été réglée pour la première expérience, de manière que les 30 kilos de terre soient exactement contenus jusqu'aux bords supérieurs, après avoir été projetés à la pelle sans compression initiale.

Dans ce cas particulier $D=0,305$.

Quatre autres valeurs ont été données à D . Elles sont fixées et déterminées chaque fois par la position des plateaux P et P' arrêtés sur des traits de repères gravés sur la paroi interne de la caisse, de façon à limiter au point voulu le serrage des vis de pression pour chaque volume correspondant. On obtient ainsi cinq volumes différents :

$$1^{\circ} \text{ Volume } 0,350 \times 0,225 \times 0,305 = 24 \text{ dm}^3 \text{ 02}$$

$$2^{\circ} \text{ Volume } 0,350 \times 0,225 \times 0,291 = 22 \text{ dm}^3 \text{ 92}$$

$$3^{\circ} \text{ Volume } 0,350 \times 0,225 \times 0,277 = 21 \text{ dm}^3 \text{ 81}$$

$$4^{\circ} \text{ Volume } 0,350 \times 0,225 \times 0,263 = 20 \text{ dm}^3 \text{ 71}$$

$$5^{\circ} \text{ Volume } 0,350 \times 0,225 \times 0,249 = 19 \text{ dm}^3 \text{ 61}$$

A chacun de ces cinq volumes correspond une densité de terre sèche. La quantité d'eau contenue dans 30 kilos de terre humide à 3,7 0/0 est égale à $\frac{30 \times 3,7}{100} = 1,11$. La quantité de terre sèche sera donc égale à $30 - 1,11 = 28 \text{ k. 89}$. D'où les cinq densités suivantes de terre absolument sèche.

$$\frac{28,89}{24,02} = 1,20 \quad \frac{28,89}{22,92} = 1,26 \quad \frac{28,89}{21,81} = 1,32$$

$$\frac{28,89}{20,71} = 1,39 \quad \frac{28,89}{19,61} = 1,47$$

Il faut déterminer maintenant les quantités d'eau à ajouter successivement afin d'obtenir les différents taux d'humidité avec une augmentation régulière de 2 0/0. Le premier taux étant 3,7 0/0. J'adopte pour les taux suivants : 6 0/0, 8 0/0, 10 0/0, 12 0/0, etc...

Calculons la quantité d'eau à ajouter à 28 kilos 89 de terre sèche pour avoir un taux de 6 0/0.

A 94 kilos de terre sèche on doit ajouter 6 k. d'eau

$$\begin{array}{rcccccc} \text{A } 1 & - & - & - & - & 6 & - \\ & & & & & \hline & & & & & 94 \\ \text{A } 28,89 & - & - & - & - & \frac{6 \times 28,89}{94} & = 1,844 \end{array}$$

La terre dite sèche contient déjà 1 k. 1 d'eau pour le taux de 3,7 0/0. Il faudra donc y ajouter pour avoir 6 0/0 $1,844 - 1,110 = 0,734$.

Des calculs analogues nous ont permis de déterminer les quantités à ajouter chaque fois à la terre déjà humide au taux précédent, pour obtenir le taux de l'expérience en cours. A chaque addition d'eau, le poids de l'ensemble augmentera et nous aurons les différents poids suivants : pour 3,7 0/0 $P=30$ k.; pour 6 0/0 $P=30,730$; pour 8 0/0 : 31,402; pour 10 0/0 : 32,090; pour 12 0/0 : 32,829; pour 14 0/0 : 33,592; pour 16 0/0 : 34,392; pour 18 0/0 : 35,231; pour 20 0/0 : 36,112.

Désignons les cinq volumes par les lettres V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 , et les différents taux d'humidité par les lettres $h_0, h_1, h_2, h_3, h_4, h_5$, etc.

On a pour les densités, le tableau à double entrée :

TABLEAU DES DENSITÉS BRUTES

	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9
V_1	1,20	1,25	1,28	1,31	1,33	1,37	1,40	1,43	1,47	1,50
V_2	1,26	1,3	1,34	1,37	1,40	1,43	1,47	1,50	1,54	1,58
V_3	1,32	1,38	1,40	1,44	1,47	1,50	1,54	1,58	1,62	1,66
V_4	1,39	1,44	1,48	1,52	1,54	1,59	1,62	1,66	1,70	1,74
V_5	1,46	1,52	1,57	1,60	1,62	1,66	1,71	1,75	1,80	1,84

A chaque case du tableau correspondent deux diagrammes : un diagramme pour la pénétration et un autre pour l'extraction. Pour distinguer ces deux diagrammes, j'ajoute au symbole de la case soit un p soit un e . Ainsi, les deux diagrammes de la case définie par le croisement de la cinquième colonne et de la quatrième rangée, seront désigner par les symboles $V_4 h_4 p$ et $V_4 h_4 e$.

Des surfaces de ces diagrammes, on déduit aisément la valeur en kilogrammètres de l'énergie motrice dépensée. Il faut pour cela connaître, d'une part, le rapport entre le déplacement du fer dans le sol et le déplacement du papier devant le crayon (rapport qui est égal à $\frac{336}{394}$ dans l'appareil qui a servi) et d'autre part le tarage du ressort.

Pour calculer la surface du diagramme, on peut employer 3 méthodes : 1°) appliquer la formule de Simpson ; 2°) utiliser le planimètre d'Amsler et 3°) la méthode des poids si le papier est de bonne qualité et homogène. C'est cette dernière méthode que j'utilise parce que elle est expéditive et que l'approximation qu'elle fournit est suffisante avec les dimensions assez grandes des diagrammes que fournit la sonde. On pèse un rectangle de

papier employé. Soient P et S les nombres qui expriment le poids et la surface de ce rectangle. On découpe avec soin le diagramme et on le pèse. Soient p et x les nombres correspondants. On obtient la proportion :

$$\frac{x}{S} = \frac{P}{p} \text{ d'où } x = S \frac{P}{p}$$

Les diagrammes ainsi obtenus, constituent une représentation imagée des phénomènes complexes, à la portée des personnes qui ne sont pas familiarisées avec les mathématiques. Ces images facilitent déjà pour l'oeil la comparaison des différentes terres au point de vue du travail. Considérons par exemple les tableaux des diagrammes que j'ai photographiés, et qui sont ainsi représentés à une échelle très réduite. Il y a neuf tableaux correspondants aux neuf humidités différentes. (Tous les tableaux sont groupés à la fin du mémoire.) Chaque tableau comprend cinq groupes de diagrammes (un groupe comprenant la pénétration au dessous de l'extraction). Si on rapproche tous ces tableaux sur une même ligne horizontale, on obtient un tableau d'ensemble des diagrammes calqué sur celui des densités brutes.

Suivant les lignes verticales, on peut suivre la variation du travail moteur d'après la variation de la densité. Suivant les lignes horizontales celle du même travail moteur d'après les variations de l'humidité. Pour donner un exemple de l'inspection possible de cette dernière dépendance, j'ai dressé un tableau des diagrammes de la densité V_3 (tableau 10) disposés dans le sens vertical.

Observations complémentaires.

Les expériences dont j'ai exposé le processus, avec les résultats obtenus, m'ont suggéré les remarques suivantes :

D'abord, il est nécessaire d'enregistrer la vitesse du mouvement en même temps que l'effort dépensé et l'espace parcouru et de compléter ainsi la connaissance du travail par celle de la puissance. Pour nous en rendre compte, analysons le fonctionnement de l'appareil.

Le mouvement de descente pendant la pénétration dépend de la différence $P - R$ entre la pression exercée sur la poignée et la résistance du milieu. La vitesse du mouvement dépend de la valeur de cette différence, mais la valeur de cette différence dépend des variations de P et de R qui peuvent avoir lieu successivement ou simultanément dans des sens quelconques, mais de toutes façons d'une manière désordonnée.

Quand on agit avec la main sur la poignée, on régularise la variation de $P - R$ en donnant à l'intensité de la pression exercée une valeur plus ou moins grande selon la résistance que l'on éprouve, afin d'obtenir un certain équilibre dynamique. Cette régularisation dépend tout de même de la fantaisie de celui qui exerce la pression et de ses dispositions au point de vue musculaire. Il peut exercer une pression plus grande que celle qui est nécessaire pour la pénétration normale du fer, c'est-à-dire pour une pénétration ni trop rapide ni trop lente.

De toutes façons, la vitesse de progression ne dépendrait pas de la résistance du milieu et par conséquent ne caractériserait pas ce milieu avec toute la précision que nous désirons. Pour éviter cette objection, il faudrait donner à P une valeur constante. Ce résultat peut être obtenu en remplaçant la pression sur la poignée par l'action d'un poids marqué sur le plateau. Dans ce cas, on mettra sur le plateau un poids total dont la valeur sera plus grande que celle de la résistance maxima que la terre devra opposer à la pénétration du fer jusqu'à une certaine profondeur. Ce poids devra être toujours le même en toutes circonstances et dans toutes les terres que l'on voudra comparer.

Avec la sonde dynamométrique à enregistrement, il faudra tenir compte des observations que je viens de développer en se conformant aux prescriptions suivantes :

Quand on utilisera la poignée, il faudra agir sans hé-

sitation de tout son poids jusqu'à la pénétration définitive et noter le nombre de secondes pendant lequel s'est exercée l'action.

Avec le plateau, il faudra placer chaque poids de 5 kilos successivement avec un intervalle de 4 secondes par exemple et noter pendant combien de secondes s'effectuera la dernière pénétration entre l'addition du dernier poids et l'arrêt du fer à la profondeur maxima de 35 centimètres. Les diagrammes ne seront comparables qu'avec cette indication supplémentaire.

Pour bien démontrer l'importance de cette indication du temps, j'ai enregistré deux diagrammes (tableau 12) avec le même taux d'humidité, dans une terre de même densité, et avec le même fer, en exagérant la différence dans la durée d'action d'un poids choisi, dans la succession des poids dont la somme est nécessaire pour la pénétration maxima de 35 centimètres. Ainsi, pour un premier diagramme, après le troisième poids de 5 kilos, j'ai attendu que son action prolongée fasse pénétrer le fer lentement; puis vers la fin de la pénétration, j'ai ajouté un quatrième poids pour obtenir la profondeur maxima de 35 centimètres. Pour le deuxième diagramme, après le troisième poids de 5 kilos j'ai ajouté sans attendre un quatrième poids puis un cinquième, puis un sixième, et pour le dernier enfin j'ai obtenu la profondeur maxima de pénétration de 35 centimètres. Il est évident que le deuxième diagramme a une surface plus grande que le premier, puisqu'il correspond à une flexion du ressort plus considérable pour un même déplacement. La compensation entre les deux, résulte de ce fait que l'action du troisième poids pour le premier diagramme s'est exer-



fig 13



fig 14

cée pendant un temps plus long. Il est donc nécessaire de noter le temps.

J'ai dû ensuite porter mon attention sur les dispositions spéciales qui permettront d'établir un rapport entre l'application de la sonde dynamométrique et le travail de la charrue.

Les diagrammes obtenus dans mes expériences ont été effectués avec une tige d'acier. Dans ces conditions les facteurs physiques qui entrent en jeux sont surtout la compression, le frottement et l'adhérence; la cohésion ayant peu d'influence. Elle en a beaucoup plus avec l'action de la charrue. La cohésion oppose un effet une forte résistance d'abord au détachement de la bande pour le logement de tout le corps de charrue et aussi pour la dislocation qui se produit directement entre la pointe du coutre et celle du soc.

Une autre action s'exerce sur le même corps de charrue, celle du poids de la terre soulevée par le plan incliné du soc et de la partie antérieure du versoir.

Pour que les données fournies par le sondage soient complètes et permettent d'établir une relation entre le travail de la sonde et celui de la charrue, il faut utiliser pour l'enregistrement du 2^e diagramme à l'extraction, un fer qui subira par suite de sa forme, l'action du poids de la terre tout en détruisant la cohésion des particules.

Pour obtenir ce résultat, j'ai d'abord construit la pièce suivante : la tige cylindrique est remplacée par un fer plat (fig. 13) dont l'extrémité inférieure est terminée en forme de coin, pour faciliter la pénétration. Au dessus de la pointe, en *a* est fixée perpendiculairement aux deux faces une tige d'acier servant de tourillons pour la ro-

tation d'une pièce métallique n (sorte de gouttière articulée). Cette gouttière prend à la pénétration la position 1 et bascule à l'extraction sous la réaction de la terre pour prendre la position 2.

J'ai remplacé ensuite cette gouttière articulée par deux branches également articulées d'une sorte d'ancre dont les deux positions sont indiquées dans la figure 14 (la première à la pénétration, la deuxième à l'extraction).

Finalement, j'utilise actuellement la grosse vrille de menuisier, dont le jeu complet présente une série de diamètres croissants jusqu'à 40 m/m. La pénétration de la vrille est obtenue sans l'appareil, par la rotation ordinaire autour de son axe, imprimée à l'aide d'une clef, et son extraction, à l'aide du cric de la tablette, après sa fixation dans la mortaise, avec un boulon, comme les autres fers. Au début de l'extraction, la terre glisse sur le plan incliné de la spire comme sur le versoir de la charrue, puis elle est arrachée sous la forme d'un cylindre qui frotte terre contre terre le long de la paroi de son logement.

Programme des recherches

L'étude des terres devra être faite dans les conditions suivantes :

Il faudra d'abord un laboratoire bien aménagé; de grandes étuves au niveau du sol, permettant l'accès de wagonnets Decauville portant la terre, des ventilateurs et des aspirateurs puissants, puis des machines productrices de froid. On pourra faire subir ainsi à la terre sans la manipuler, des alternatives de sécheresse et d'humidité, de gel et de dégel, etc...

Chaque sondage devra fournir 3 diagrammes : un diagramme de pénétration, un diagramme d'extraction avec le même fer, un diagramme d'extraction avec la vrille.

Les diagrammes de pénétration seront obtenus sous l'action des poids marqués de cinq kilos superposés successivement à intervalles réguliers. Les diagrammes d'extraction sous l'action de la manivelle du cric, avec notation du temps employé.

On prélèvera dans les terres naturelles des échantillons de nature physique différente qui présenteront d'après l'analyse, les caractéristiques des types généralement admis : terrains argileux, calcaire, siliceux, argilo-cal-

caire, argilo-siliceux et calcaire siliceux avec des proportions variables d'humus.

On devra aussi constituer de toutes pièces des terrains artificiels avec un mélange d'argile pure, de calcaire pur, de sable pur, et d'humus dans des proportions voulues.

La possibilité de ces expériences sur une quantité de matière relativement peu considérable, est un des avantages les plus précieux de la méthode.

Chaque type de terre étudié sera traité comme la terre dont l'étude m'a servi d'exemple. Le travail moteur sera considéré comme une fonction de l'humidité puis comme une fonction de la densité. On prendra un plus grand nombre de densités et un plus grand nombre de taux d'humidité pour mieux étudier la variation de chaque fonction. Le taux d'humidité devra atteindre un maximum de 30 0/0, valeur pour laquelle les travaux de la terre seront pratiquement impossibles.

Pour chaque type de terre, on obtiendra un tableau d'ensemble dressé chaque fois dans les mêmes conditions. Le total général des diagrammes de chaque tableau, caractérisera chaque type si l'on prend comme unité le nombre le plus petit et si l'on déduit les coefficients de résistance de tous les autres types par rapport à lui.

D'un côté, en désignant par y la fonction travail moteur et par x la variable (humidité ou densité), on déterminera la forme de chaque fonction pour chaque type de terre, en considérant soit les totaux des colonnes verticales pour la variable humidité, soit les totaux des colonnes horizontales pour la variable densité. On en tirera les valeurs des coefficients.

Je considère que pour le moment, la pratique constante

de la sonde dans chaque cas particulier, sera nécessaire pour établir un parallélisme entre son action et celle des machines employées sur le terrain. De cette façon, on pourra en tirer des rapports intéressants pour la pratique locale. Plus tard, à la suite d'un grand nombre d'expériences dans des conditions très variées au laboratoire et en plein champ, on pourra, en rapprochant tous les résultats obtenus en tirer des déductions heureuses, ayant un caractère plus général.

Utilisation pratique de la sonde dynamométrique.

La sonde dynamométrique peut être utilisée dans la pratique par un agriculteur qui voudra suivre les variations de l'état physique et mécanique de sa terre sous l'influence des agents atmosphériques, des saisons et de la succession des cultures.

Il pourra noter la valeur des surfaces des diagrammes enregistrés, considérer la surface comme une fonction du temps écoulé et tracer la courbe représentative. Ce sera la « courbe des diagrammes ». La variation de l'état physique ne peut pas être très brusque. L'allure générale de la courbe pourra être comparée chaque année à celles des années précédentes.

Je pense que d'autre part la sonde pourra être utilisée pour déterminer *a priori* l'énergie motrice qu'il faudra dépenser pour les travaux de culture. Pour atteindre ce but, il suffit de déterminer un certain rapport entre le travail de la sonde dans une terre déterminée et celui d'une charrue donnée dans cette même terre. Ce rapport dépend lui même de celui qui existe déjà entre les deux diagrammes de la pénétration et de l'extraction. Or, le

rapport des influences physiques (compression, frottement, adhérence, cohésion, poids) change de la pénétration à l'extraction. Ainsi à l'extraction, quand on utilise la tige cylindrique, la compression disparaît. Ce dernier rapport devra donc être réglé par la mise au point de la forme et des dimensions des fers, subissant l'action des influences physiques dans des conditions comparables avec le travail de la charrue. Cette mise au point ne sera qu'approchée.

Je pense d'ailleurs, qu'il n'est pas nécessaire que le travail de la sonde soit identique à celui de la charrue, pour que les actions soient comparables, et que cette comparaison permette d'établir un rapport. Deux terres qui auront donné le même diagramme moyen, à la suite de plusieurs sondages, seront elles-mêmes comparables, si elles ne sont pas identiques au point de vue de la dépense de travail exigée par une charrue donnée. Ce travail pourra être calculé, je crois, avec une approximation suffisante dans la pratique.

Supposons par exemple, que la charrue employée ait exigé au dynamomètre enregistreur de traction, pour des dimensions données de labour, un travail de V kilogrammètres pour un sillon de 10 mètres, et qu'au même instant, à la même profondeur, la sonde dynamométrique ait fourni à son tour pour 10 sondages n kilogrammètres. Si dans la suite, avant d'effectuer un labour, nous trouvons pour 10 sondages à la profondeur choisie, dans la même terre, un nombre n' on pourra écrire :

$$x = n' \frac{N}{n}$$

x étant le nombre de kilogrammètres qui seront dépensés sur 10 mètres pour effectuer le travail de la terre avec cette charrue, pour les mêmes dimensions de labour. En rapportant à l'unité de longueur l'expression du travail, on connaîtra la valeur de l'effort moyen pendant ce déplacement. On en déduira les dispositions à prendre au point de vue de la traction.

On pourra effectuer les mêmes calculs parallèlement pour plusieurs charrues de l'exploitation. Les charrues devront subir le même réglage pour l'équilibre, pendant le travail, de manière à éviter par exemple un appui exagéré du sep dans le fond de la raie. Il faudra aussi tenir compte de l'inclinaison du terrain, qui change la valeur de la traction, comme pour un véhicule quelconque, en plus ou en moins.

La sonde dynamométrique pourra être enfin utilisée dans l'étude spéciale du tassement du sol sous l'influence de la foulée, dans le travail des différents animaux employés, et aussi sous la pression des différents tracteurs.

Je devais entreprendre cette étude comparée au dernier concours de motoculture de Buc (Seine-et-Oise) où tous les modèles se trouvaient réunis. L'opération en plein air exigeait un temps propice. Le mécanisme d'enregistrement ne pouvait pas être exposé aux intempéries. Or, le temps ne fut pas favorable. Je reprendrai donc cette application au prochain concours de motoculture.

APPENDICE

Approximation des mesures fournies par l'appareil.

La surface du diagramme est enregistrée grâce à deux mouvements suivant les deux axes de coordonnées rectangulaires dans le plan. Calculons l'approximation obtenue suivant chaque mouvement.

1° Approximation dans l'estimation de la flexion du ressort d'après le déplacement du crayon des efforts sur le papier du cylindre.

Un poids de 20 kilos a donné un déplacement de 24 m/m.

100 kilos donneraient un déplacement de $\frac{24 \times 100}{20} = 120$

Un poids de 30 kilos a provoqué un déplacement de 36 m/m.

100 kilos provoqueraient un déplacement $\frac{36 \times 100}{30} = 120$.

avec 40 kilos (même raisonnement) $\frac{47 \times 100}{40} = 118$.

avec 50 kilogs — — $\frac{58 \times 100}{50} = 116$.

avec 60 kilogs — — $\frac{69 \times 100}{60} = 115$.

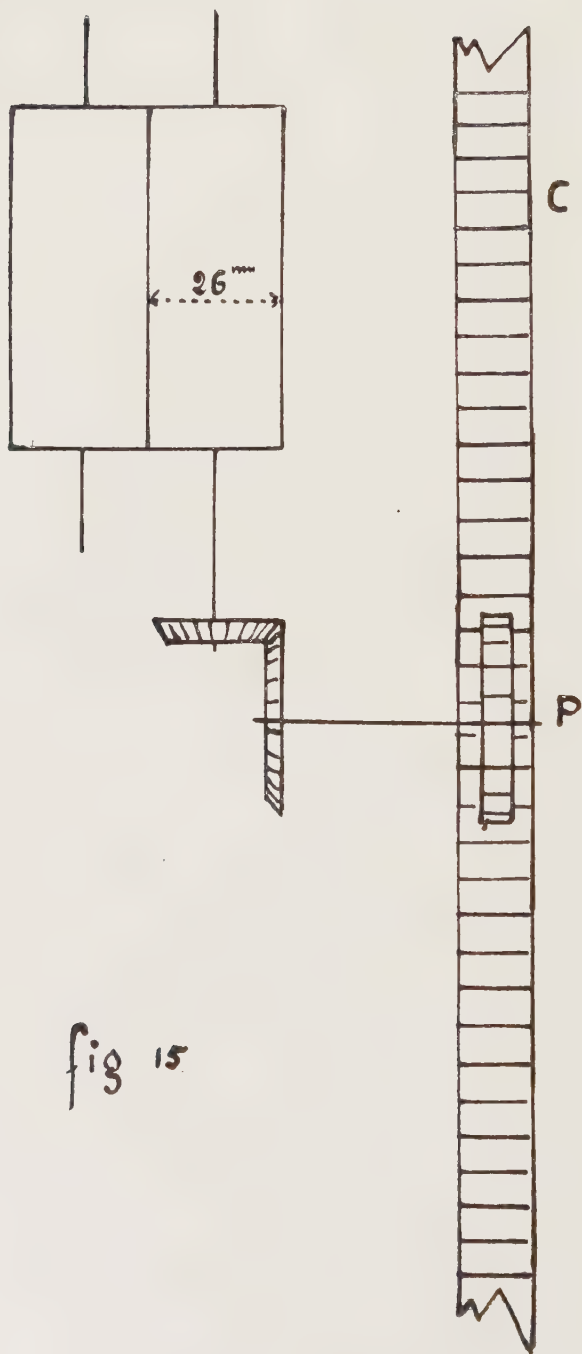


fig 15

Déplacement moyen pour 100 $\frac{589}{5}=117,8$ soit 118.

Différence entre les valeurs extrêmes et la valeur moyenne : $120 - 118=2$ soit 2 0/0;

$118 - 115=3$ soit 3 0/0;

Approximation 3 0/0.

2° Approximation dans l'estimation de la profondeur de la pénétration d'après le déplacement du papier devant le crayon des espaces.

336 m/m de fer ont pénétré en terre pendant un déplacement du papier de 394 m/m; 100 m/m. de pénétration correspondront par conséquent à $\frac{394 \times 100}{336}=117$.

Autres mesures :

312,5	369	=118
333,5	388,5	117
305,5	357	117

Détermination du même rapport par le calcul, d'après la multiplication des engrenages.

Le pignon (fig. 15) a 23 dents.

Une longueur de 100 m/m. sur la crémaillère C comprend 33 dents.

Un tour complet du pignon correspondra à la pénétration du fer pour une longueur de $\frac{23 \times 100}{33}=69,696$ ou 69,70.

Le cylindre moteur (d'entraînement du papier) qui est muni d'une gaine en caoutchouc présente en comprenant la gaine, un diamètre de 26 m/m. La circonférence de sa section droite aura donc comme longueur $2 \times \pi \times 13 = 81,64$.

Par conséquent 69,70 de fer doivent pénétrer en terre pendant un déplacement du papier de 81,64 et

100 m/m de fer devront pénétrer pour un déplacement de

$$\frac{81,64 \times 100}{69,70} = 117$$

Ces résultats nous permettent de considérer le nombre 117 comme exact. Ils démontrent en même temps qu'il n'y a pas de glissement et que l'entraînement est parfait.

Nous avons trouvé comme nombre le plus éloigné 118, d'où une erreur de 1 0/0. L'approximation est donc de 1 0/0.

L'approximation de l'enregistrement de la surface sera donc égale à $3 + 1 = 4$ soit 4 0/0.

Il y a, bien entendu, une autre approximation dans le calcul direct de la surface qui dépendra de la méthode employée (méthode des poids, planimètre, formule de Simpson). Il conviendra qu'elle soit inférieur à 1 0/0.

Deuxième Thèse

Propositions données par la Faculté

Analyse physique des terres

TABLEAU I

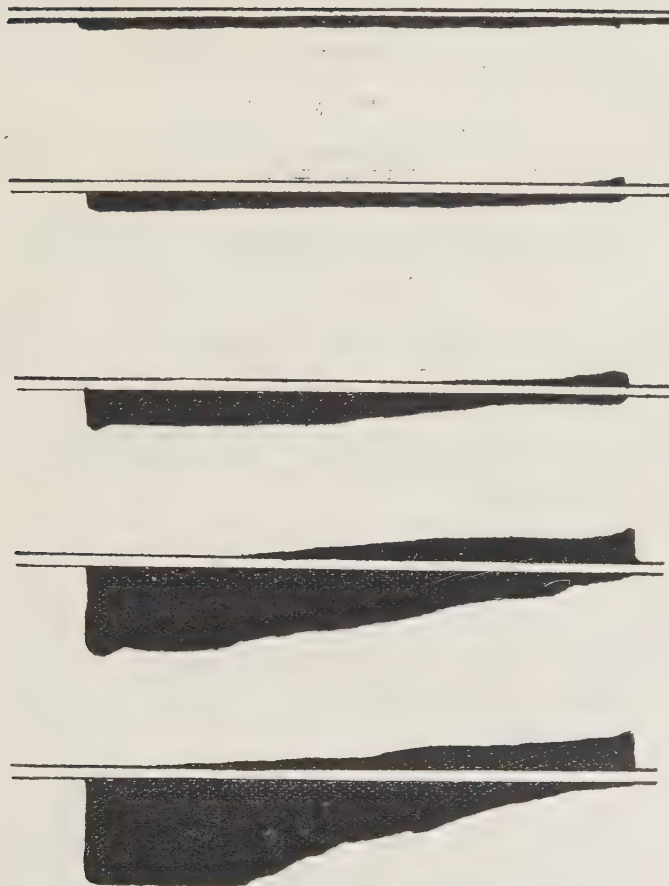


Tableau des variations du travail moteur en fonction de la densité (voir le tableau des densités brutes) pour une humidité $h_{1,2} = 3,7 \%$.

TABLEAU II

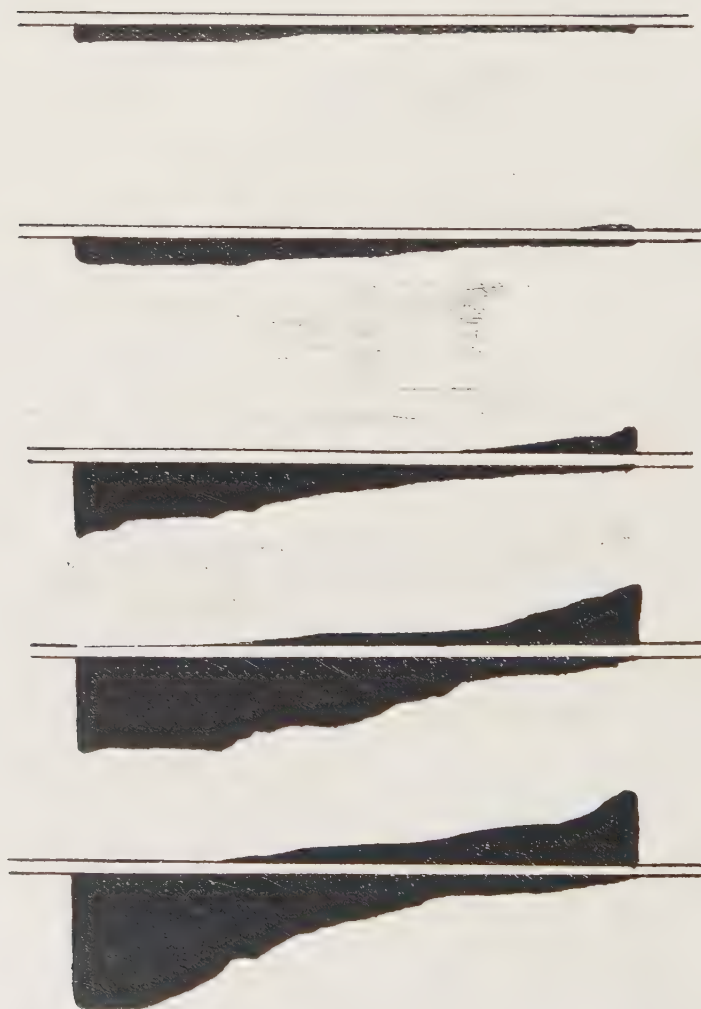


Tableau des variations du travail moteur en fonction de la densité (voir le tableau des densités brutes) pour une humidité $h_g = 6 \%$.

TABLEAU III

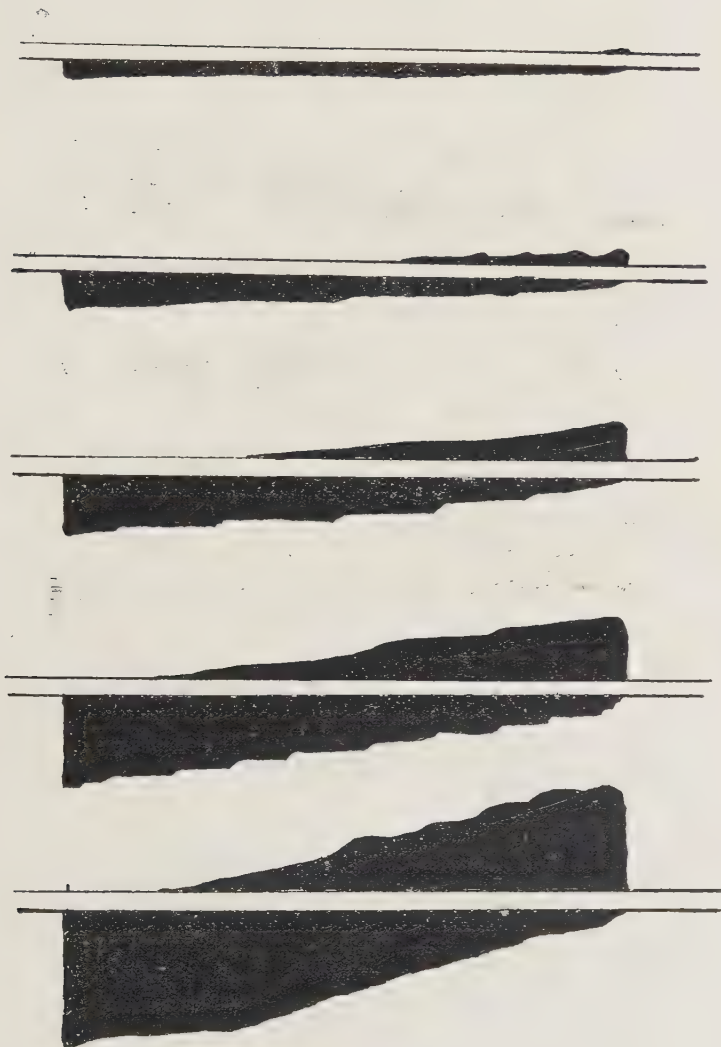


Tableau des variations du travail moteur en fonction de la densité pour une humidité $h_3 = 8 \%$ (voir le tableau des densités brutes).

TABEAU IV

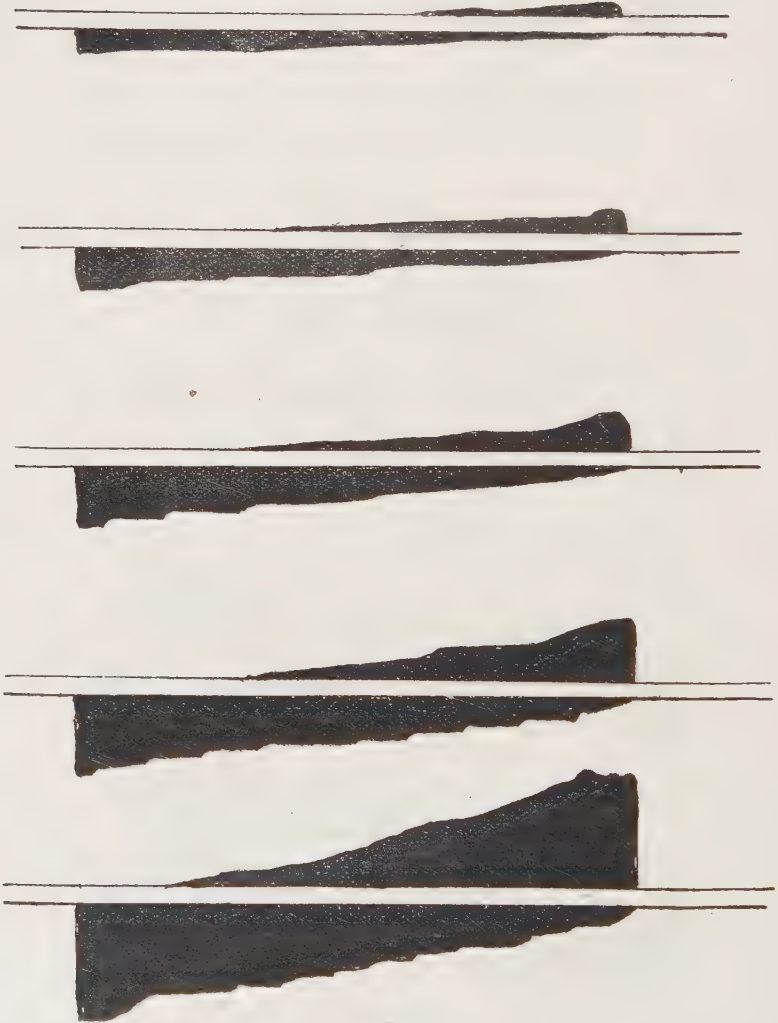


Tableau des variations du travail moteur en fonction de la densité pour une humidité $h_4' = 10 \%$ (voir le tableau des densités brutes).

TABLEAU V

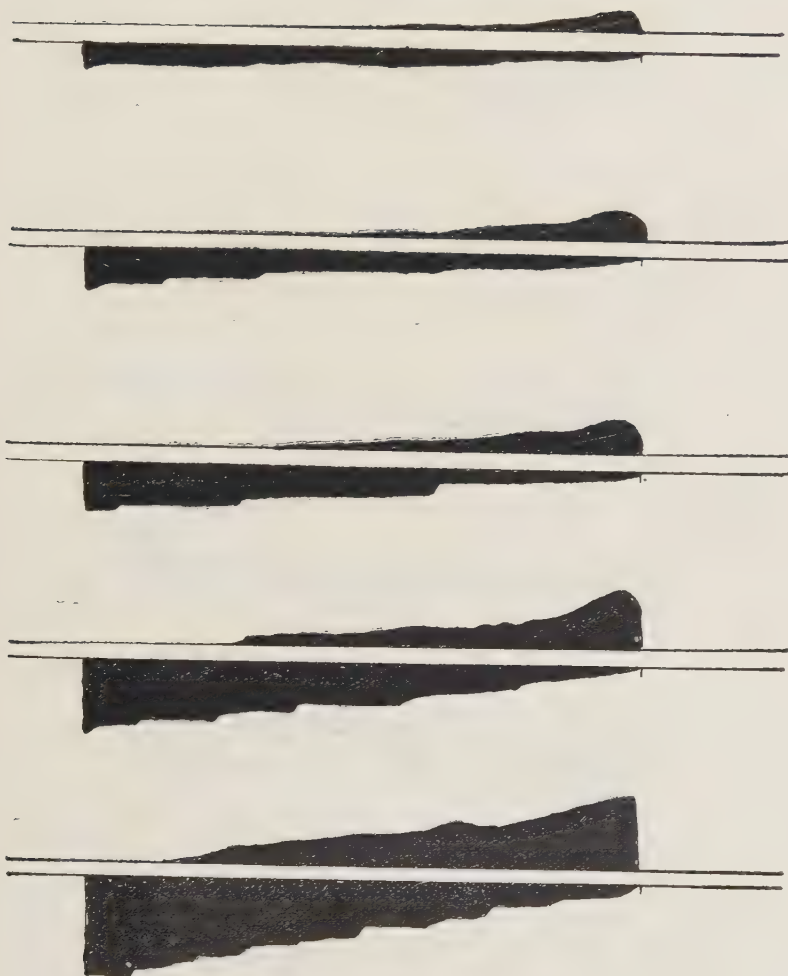


Tableau des variations du travail moteur en fonction de la densité pour une humidité $h_5 = 12 \%$ (voir le tableau des densités brutes).

TABLEAU VI

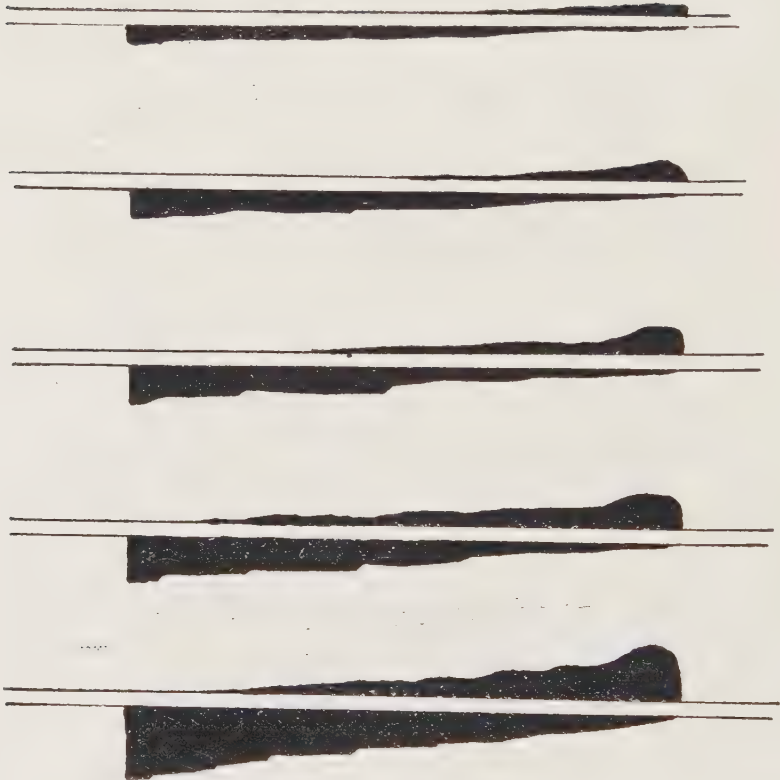
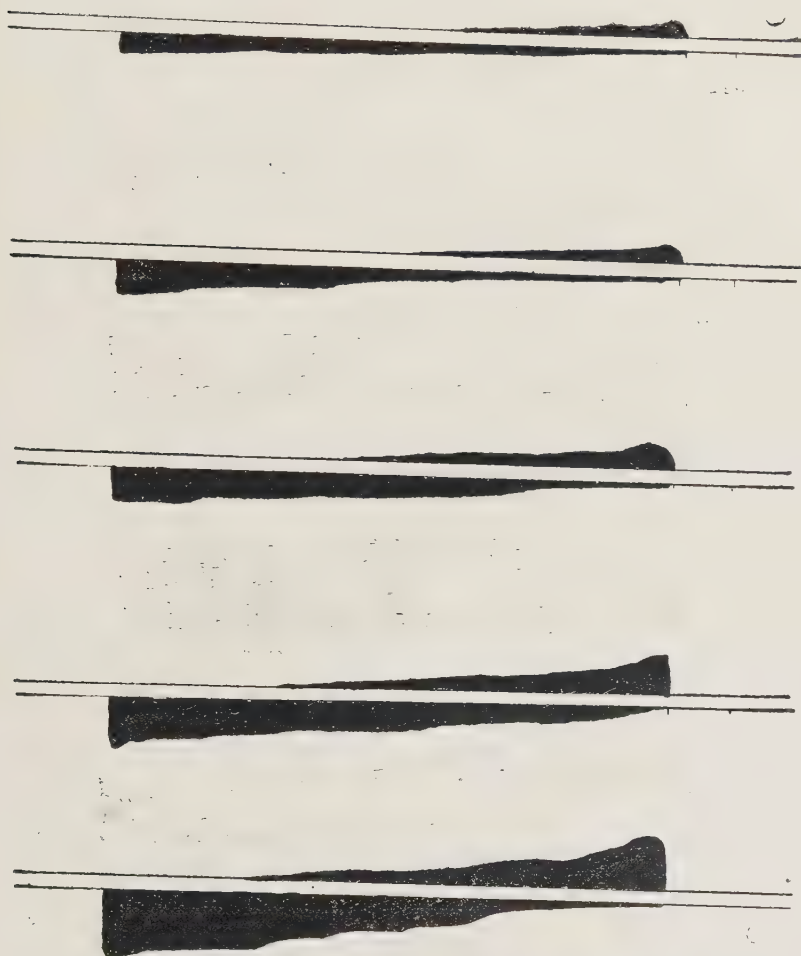


Tableau des variations du travail moteur en fonction de la densité pour une humidité $h_6 = 14 \%$ (voir le tableau des densités brutes).

TABLEAU VII



[Redacted]
[Redacted]
[Redacted]
[Redacted]
[Redacted]

Tableau des variations du travail moteur en fonction de la densité pour une humidité $h_7 = 16 \%$ (voir le tableau des densités brutes).

TABLEAU VIII



Tableau des variations du travail moteur en fonction de la densité pour une humidité $h_g = 18 \%$ (voir le tableau des densités brutes).

TABLEAU IX

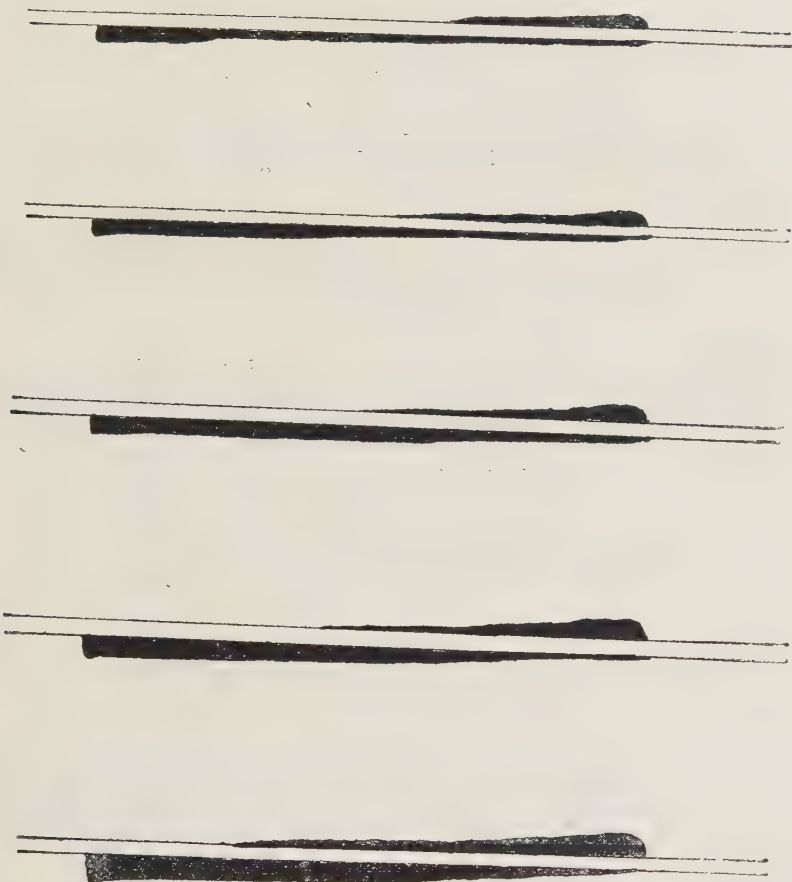


Tableau des variations du travail moteur en fonction de la densité pour une humidité $h_g = 20 \%$ (voir le tableau des densités brutes).

TABLEAU X

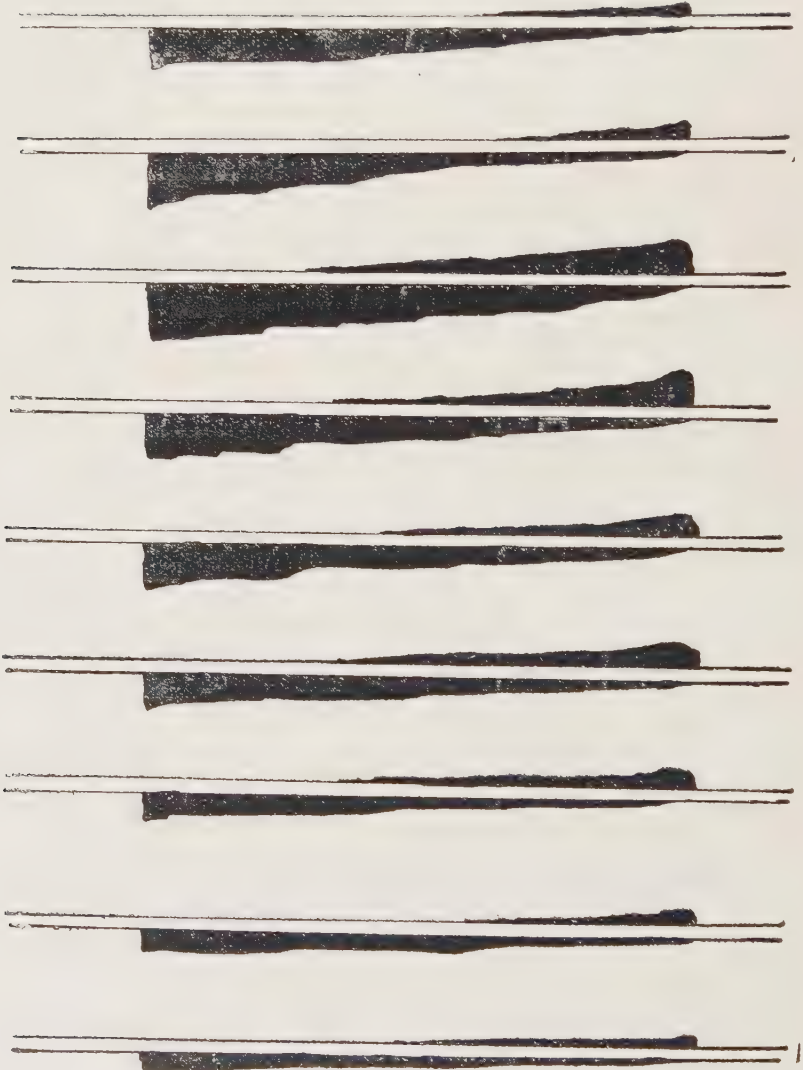


Tableau des variations du travail moteur en fonction
de l'humidité pour une densité de terre sèche égale à 1,32.

TABLEAU XI



Diagrammes obtenus dans la même terre, au même moment, à la même profondeur, avec deux fers différents.

TABLEAU XII



Diagrammes obtenus dans la même terre, au même moment, à la même profondeur, avec le même fer, avec deux vitesses de pénétration différentes.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	7
Economie de la traction dans les labours. — Rôle de la charrue.	
INFLUENCE DU SOL — NECESSITE DU SONDAGE	11
Connaissance actuelle de l'état physique et mécanique des terrains agricoles. — Bêche dynamométrique de Gasparin. — Nécessité de créer un appareil plus sensible et plus complet.	
DESCRIPTION DE LA SONDE	17
Premier dispositif pour le sondage en plein champ. — Mécanisme de liaison entre la puissance exercée sur la poignée et la résistance opposée par le sol: 1°) à la pénétration du fer 2°) à son extraction. — Mécanisme de l'enregistrement des diagrammes. — Forme rationnelle à donner au fer. — Deuxième dispositif de l'appareil pour le laboratoire.	
UTILISATION DE LA SONDE — TRAITEMENT DE LA TERRE	32
Recherche d'une méthode de travail. — Variation expérimentale de l'humidité. — Dessiccation préalable de la terre et réincorporation de l'eau par fractions connues. — Variation expérimentale de la densité. — Influence de l'eau et des espaces lacunaires — Détermination de la densité en plein champ. — Méthode du flacon: densité nette. — Méthode des cylindres : densité brute. — Variation du volume par compression de la terre. — Caisse de compression à deux pistons.	

RESULTATS DES EXPERIENCES	44
Tableau des densites brutes. — Enregistrement des diagrammes.	
OBSERVATIONS COMPLEMENTAIRES	49
Influence de la vitesse. — Son enregistrement. — Rapport entre le travail de la charrue et celui de la sonde. — Utilisation d'un fer de forme appropriée.	
PROGRAMME DES RECHERCHES	55
UTILISATION PRATIQUE DE LA SONDE DYNAMOMETRIQUE	58
Courbe de variation annuelle de l'état physique et mécanique d'un sol. — Possibilités de la détermination a priori de l'énergie motrice qu'il faudra dépenser dans les travaux de culture — Etude possible des tassements provoqués par les tracteurs et par la foulée des animaux.	
APPENDICE	61
Approximation des mesures fournies par l'appareil.	

IMPRIMERIE DES PRESSES UNIVERSITAIRES

DE FRANCE

